



**Universidad Michoacana de San  
Nicolás de Hidalgo**

**Facultad de Ingeniería en Tecnología  
de la Madera**

**MAESTRÍA EN CIENCIAS Y TECNOLOGÍA DE LA MADERA**

**TESIS**

**OBTENCIÓN DE PULPA CELULÓSICA KRAFT A PARTIR DE  
*Eichhornia crassipes* Kunth**

Que para obtener el grado de: Maestro en Ciencias y Tecnología de  
la Madera

Presenta

Ing. Luis Fernando Pintor Ibarra

Director de tesis: Dr. José Guadalupe Rutiaga Quiñones

Asesor: M.C. J. Jesús Rivera Prado (UdG)

Morelia, Michoacán, Agosto 2016



## ÍNDICE

<b>1.</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>2.</b>	<b>ANTECEDENTES</b>	<b>2</b>
2.1.	Antecedentes de <i>Eichhornia crassipes</i> como material lignocelulósico	2
2.2.	Antecedentes sobre pulpa celulósica a partir de <i>Eichhornia crassipes</i>	3
<b>3.</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>4</b>
3.1.	Objetivo general	4
3.2.	Objetivos específicos	4
<b>4.</b>	<b>HIPÓTESIS</b>	<b>4</b>
<b>5.</b>	<b>JUSTIFICACIÓN</b>	<b>5</b>
<b>6.</b>	<b>METODOLOGÍA</b>	<b>6</b>
<b>6.1.</b>	<b>Recolección del material de estudio</b>	<b>6</b>
<b>6.2</b>	<b>Propiedades físicas y químicas de la biomasa de <i>Eichhornia crassipes</i>.</b>	<b>7</b>
6.2.1.	Preparación de la biomasa de <i>Eichhornia crassipes</i>	8
6.2.2.	Contenido de humedad	8
6.2.3.	Densidad	8
6.2.4.	pH	8
6.2.5.	Cenizas	8
6.2.6.	Microanálisis de las cenizas	9
6.2.7.	Extraíbles.	9
6.2.8.	Lignina	9
6.2.9.	Holocelulosa.	9
6.2.10.	Alfacelulosa	10
<b>6.3.</b>	<b>Pulpeo Kraft e índices de calidad de la pulpa celulósica</b>	<b>11</b>
6.3.1.	Preparación del material	11
6.3.2.	Análisis del licor blanco	11
6.3.3.	Cocción Kraft	12
6.3.4.	Morfología e índices de calidad de la pulpa celulósica	13
6.3.5.	Lavado, depurado, centrifugado y homogenizado de la pulpa café	14
6.3.6.	Caracterización de la pulpa café kraft de <i>Eichhornia crassipes</i> y de pulpa café	14
<b>6.4.</b>	<b>Blanqueo de la pulpa kraft mediante la secuencia O1O2D<sub>1</sub>(PO)D2HD3</b>	<b>15</b>
6.4.1.	Lavado, centrifugado y homogenizado de la pulpa después de cada etapa.	16
6.4.2.	Caracterización de la pulpa blanqueada	16

<b>6.5.</b>	<b>Evaluación físico-mecánica de hojas estándar sin blanquear y blanqueadas de <i>Eichhornia crassipes</i>, pulpa industrial de <i>Pinus</i> spp y mezclas Lirio-Pino</b>	<b>17</b>
6.5.1.	Refinación de la pulpa	17
6.5.2.	Grado de refinación	18
6.5.3.	Formación de hojas estándar	18
6.5.4.	Pruebas físico-mecánicas de las hojas estándar	18
<b>7.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>19</b>
<b>7.1.</b>	<b>Propiedades físicas y químicas de la biomasa de <i>Eichhornia crassipes</i>.</b>	<b>19</b>
7.1.1.	Humedad	19
7.1.2.	Densidad	19
7.1.3.	pH	22
7.1.4.	Cenizas	23
7.1.5.	Extraíbles	23
7.1.6.	Lignina Runkel	24
7.1.7.	Holocelulosa	24
7.1.8.	Alfacelulosa	25
7.1.9.	Microanálisis de cenizas	25
<b>7.2.</b>	<b>Pulpeo Kraft</b>	<b>28</b>
7.2.1.	Rendimiento	28
7.2.2.	Rechazos	31
7.2.3.	No. de kappa	33
7.2.4.	Cenizas	35
7.2.5.	pH	37
7.2.6.	Álcali residual	39
7.2.7.	Sólidos totales	42
<b>7.3.</b>	<b>Morfología e índices de calidad de la pulpa celulósica</b>	<b>44</b>
7.4.	Caracterización de la pulpa café kraft de <i>Eichhornia crassipes</i> y de pulpa industrial kraft de <i>Pinus</i> spp	47
<b>7.5.</b>	<b>Blanqueo de la pulpa kraft mediante la secuencia O<sub>1</sub>O<sub>2</sub>D<sub>1</sub>(PO)D<sub>2</sub>HD<sub>3</sub></b>	<b>48</b>
<b>7.6.</b>	<b>Evaluación de las propiedades físicomecánicas de la pulpa blanqueada de <i>Eichhornia crassipes</i></b>	<b>49</b>
<b>7.7.</b>	<b>Evaluación de las propiedades físicomecánicas en hojas estándar de pulpa café de <i>E. crassipes</i>, pulpa industrial de <i>Pinus</i> spp y mezclas Lirio-Pino</b>	<b>51</b>
7.7.1.	Curva de refinación de la pulpa kraft de <i>Eichhornia crassipes</i> y pulpa industrial de <i>Pinus</i> spp.	51
7.7.2.	Espesor	54
7.7.3.	Porosidad	54

7.7.4.	Índice de tensión	55
7.7.5.	Índice de explosión	56
7.7.6.	Índice de rasgado	57
7.7.7.	Doblez	58
7.7.8.	Opacidad	59
7.7.9.	Blancura	60
<b>8.</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>61</b>
<b>9.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>63</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla		Pag.
1	Antecedentes de <i>Eichhornia crassipes</i> como material lignocelulósico	2
2	Antecedentes sobre pulpa celulósica a partir de <i>Eichhornia crassipes</i> .	3
3	Diseño experimental para la cocción de pulpeo kraft de <i>Eichhornia crassipes</i> .	13
4	Técnicas utilizadas para caracterizar la pulpa café kraft	14
5	Condiciones de operación del proceso de blanqueo mediante la secuencia O <sub>1</sub> O <sub>2</sub> D <sub>1</sub> (PO)D <sub>2</sub> HD <sub>3</sub> .	16
6	Técnicas utilizadas para caracterizar la pulpa blanqueada	16
7	Técnicas utilizadas para caracterizar las propiedades físico-mecánicas de la pulpa café kraft y pulpa blanqueada	19
8	Propiedades físicas y químicas de <i>Eichhornia crassipes</i> y sus efectos en la industria de celulosa y papel	20
9	Elementos inorgánicos encontrados en <i>Eichhornia crassipes</i> y su efecto de en la industria de pulpa y papel.	26
10	Análisis de varianza (ANOVA) para el rendimiento a 10% de carga de reactivos	28
11	Análisis de varianza (ANOVA) para el rendimiento a 20% de carga de reactivos	28
12	Condiciones óptimas de rendimiento a 10% carga de reactivos	30
13	Condiciones óptimas de rendimiento a 20% carga de reactivos	30
14	Análisis de varianza (ANOVA) para rechazos a 10% de carga de reactivos	31
15	Análisis de varianza (ANOVA) para rechazos a 20% de carga de reactivos	31
16	Condiciones óptimas de rechazos a 10% carga de reactivos	32
17	Condiciones óptimas de rechazos a 20% carga de reactivos	32
18	Análisis de varianza (ANOVA) para No. de kappa a 10% de carga de reactivos	33
19	Análisis de varianza (ANOVA) para No. de kappa a 20% de carga de reactivos	33
20	Condiciones óptimas de No. de kappa a 10% carga de reactivos	34
21	Condiciones óptimas de No. de kappa a 20% carga de reactivos	34
22	Análisis de varianza (ANOVA) para cenizas a 10% de carga de reactivos	35
23	Análisis de varianza (ANOVA) para cenizas a 20% de carga de reactivos	35
24	Condiciones óptimas de cenizas a 10% carga de reactivos	36
25	Condiciones óptimas de cenizas a 20% carga de reactivos	36
26	Análisis de varianza (ANOVA) para el pH del licor negro a 10% de carga	37

	de reactivos.	
27	Análisis de varianza (ANOVA) para pH del licor negro a 20% de carga de reactivos.	38
28	Condiciones óptimas de pH en el licor negro a 10% carga de reactivos	38
29	Condiciones óptimas de pH en el licor negro a 20% carga de reactivos	39
30	Análisis de varianza (ANOVA) para álcali residual a 10% de carga de reactivos	39
31	Análisis de varianza (ANOVA) para álcali residual a 20% de carga de reactivos	40
32	Condiciones óptimas de álcali residual a 10% carga de reactivos	41
33	Condiciones óptimas de álcali residual a 20% carga de reactivos	41
34	Análisis de varianza (ANOVA) para sólidos totales a 10% de carga de reactivos	42
35	Análisis de varianza (ANOVA) para sólidos totales a 20% de carga de reactivos	42
36	Condiciones óptimas de sólidos totales a 10% carga de reactivos	43
37	Condiciones óptimas de sólidos totales a 20% carga de reactivos	43
38	Resultados de la morfología de las fibras e índices de calidad de la pulpa de <i>Eichhornia crassipes</i> y comparativo con otros materiales fibrosos.	46
39	Caracterización de la pulpa kraft café de <i>Eichhornia crassipes</i> y <i>Pinus</i> spp	47
40	Caracterización de la pulpa kraft de <i>Eichhornia crassipes</i> después de cada etapa de la secuencia de blanqueo	49
41	Resultados de las propiedades físico-mecánicas de la pulpa blanqueada de <i>Eichhornia crassipes</i> y comparativo con pulpa blanqueada <i>Ricinus communis</i> y fibra larga industrial de <i>Pinus</i> spp.	50
42	Propiedades físico-mecánicas de la pulpa kraft de <i>Eichhornia crassipes</i> .	52
43	Propiedades físico-mecánicas de la pulpa kraft industrial de <i>Pinus</i> spp.	52
44	Propiedades físico-mecánicas de las mezclas de pulpa kraft Lirio-Pino sin refinar	53
45	Propiedades físico-mecánicas de las mezclas de pulpa kraft Lirio-Pino refinadas.	53

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		Pag.
1	Ubicación geográfica del sitio de la colecta de <i>Eichhornia crassipes</i>	6
2	Diagrama de metodologías de las propiedades físicas y químicas de la biomasa de <i>Eichhornia crassipes</i>	7
3	Diagrama de la metodología de pulpeo kraft sus variables de respuesta, morfología e índices de calidad de la pulpa celulósica	11
4	Diagrama del proceso para las cocciones del pulpeo kraft.	12
5	Diagrama de la metodología para la caracterización de la pulpa café	14
6	Diagrama de las etapas de blanqueo de la pulpa café mediante la secuencia $O_1O_2D_1(PO)D_2HD_3$ .	15
7	Hojas estándar de 1.2g (59.68 g/m <sup>2</sup> ), <b>a)</b> hoja de pulpa kraft de <i>Eichhornia crassipes</i> , <b>b)</b> hoja de pulpa blanqueada de <i>E. crassipes</i> , <b>c)</b> hoja de pulpa kraft industrial de <i>Pinus</i> spp, <b>d)</b> Hoja de mezcla Lirio-Pino.	17
8	Diagrama de las propiedades físicomecánicas de hojas estándar sin blanquear y blanqueadas de <i>Eichhornia crassipes</i> , pulpa industrial de <i>Pinus</i> spp y mezclas Lirio-Pino.	18
9	Grafica de efectos principales de rendimiento <b>a)</b> 10% carga de reactivos, <b>b)</b> 20% carga de reactivos	29
10	Superficies de respuesta para el rendimiento en función de la temperatura y tiempo <b>a)</b> 10% carga de reactivos, <b>b)</b> 20% carga de reactivos.	30
11	Grafica de efectos principales de rechazos <b>a)</b> 10% carga de reactivos, <b>b)</b> 20% carga de reactivos	32
12	Superficies de respuesta para los rechazos en función de la temperatura y tiempo <b>a)</b> 10% carga de reactivos, <b>b)</b> 20% carga de reactivos.	32
13	Grafica de efectos principales de No. de kappa <b>a)</b> 10% carga de reactivos, <b>b)</b> 20% carga de reactivos.	34
14	Superficies de respuesta para No. de kappa en función de la temperatura y tiempo <b>a)</b> 10% carga de reactivos, <b>b)</b> 20% carga de reactivos	35
15	Grafica de efectos principales de cenizas <b>a)</b> 10% carga de reactivos, <b>b)</b> 20% carga de reactivos.	36
16	Superficies de respuesta para cenizas en función de la temperatura y tiempo <b>a)</b> 10% carga de reactivos, <b>b)</b> 20% carga de reactivos.	37
17	Grafica de efectos principales de pH <b>a)</b> 10% carga de reactivos, <b>b)</b> 20% carga de reactivos.	38
18	Superficies de respuesta para pH en función de la temperatura y tiempo <b>a)</b> 10% carga de reactivos, <b>b)</b> 20% carga de reactivos.	39
19	Grafica de efectos principales de álcali residual <b>a)</b> 10% carga de reactivos, <b>b)</b> 20% carga de reactivos.	40

20	Superficies de respuesta para álcali residual en función de la temperatura y tiempo <b>a)</b> 10% carga de reactivos, <b>b)</b> 20% carga de reactivos.	41
21	Grafica de efectos principales de solidos totales <b>a)</b> 10% carga de reactivos, <b>b)</b> 20% carga de reactivos	43
22	Superficies de respuesta para solidos totales en función de la temperatura y tiempo <b>a)</b> 10% carga de reactivos, <b>b)</b> 20% carga de reactivos.	44
23	Disociado de <i>E. crassipes</i> , <b>a)</b> y <b>b)</b> Se aprecia la longitud de la fibra (objetivo 4x y 10x)	45
24	Clasificación de fibras de la pulpa kraft café de <i>Eichhornia crassipes</i> y <i>Pinus</i> spp.	48
25	Comportamiento del espesor en la pulpa café <b>a)</b> <i>E. crassipes</i> y <i>Pinus</i> spp industrial, <b>b)</b> mezclas de pulpa café lirio-pino.	54
26	Comportamiento de la porosidad en la pulpa café <b>a)</b> <i>E. crassipes</i> y <i>Pinus</i> spp industrial, <b>b)</b> mezclas de pulpa café lirio-pino.	55
27	Comportamiento de índice de tensión en la pulpa café <b>a)</b> <i>E. crassipes</i> y <i>Pinus</i> spp industrial, <b>b)</b> mezclas de pulpa café lirio-pino.	56
28	Comportamiento de índice de explosión en la pulpa café <b>a)</b> <i>E. crassipes</i> y <i>Pinus</i> spp industrial, <b>b)</b> mezclas de pulpa café lirio-pino.	57
29	Comportamiento de índice de tensión en la pulpa café <b>a)</b> <i>E. crassipes</i> y <i>Pinus</i> spp industrial, <b>b)</b> mezclas de pulpa café lirio-pino.	58
30	Comportamiento del No. de doblez en la pulpa café <b>a)</b> <i>E. crassipes</i> y <i>Pinus</i> spp industrial, <b>b)</b> mezclas de pulpa café lirio-pino.	59
31	Comportamiento de la opacidad <b>a)</b> <i>E. crassipes</i> y <i>Pinus</i> spp industrial, <b>b)</b> mezclas de pulpa café lirio-pino.	60
32	Comportamiento de la blancura en la pulpa café <b>a)</b> <i>E. crassipes</i> y <i>Pinus</i> spp industrial, <b>b)</b> mezclas de pulpa café lirio-pino.	61

## ABSTRACT

The biomass of *Eichhornia crassipes* was collected in the “Cuitzeo” Lake, Michoacán, Mexico. The moisture content, density and chemical components of the plant, root, stem and leaves (pH, ash and microanalysis, extracts, lignin, holocelulosa and  $\alpha$ -cellulose) was evaluated. Kraft pulp was obtained and a morphology and quality index of the cellulosic pulp is characterized, besides the pulp bleaching was performed by O<sub>1</sub>O<sub>2</sub>D<sub>1</sub>(PO)D<sub>2</sub>HD<sub>3</sub> sequence. To assess the quality of the physical-mechanical kraft pulp properties were determined: weight, thickness, porosity, tensile index, burst index, tear index, bending, opacity and brightness, this was done in unbleached pulp, bleached pulp, industrial pulp and mixtures *Pinus* spp Lirio-Pino 20-80, 40-60, 60-40 and 80-20%. The moisture content through the plant ranged from 85.34 to 93.61%, the pH values were close to neutral value, high amounts of ash that ranged from 14.37 to 20.78%, in microanalysis ashes were detected the following elements: K, Cl, Ca, Na, Mg, Si, Al, P, S, Mn, Fe and Ti. The major chemical components varied as follows: extractives (21.82-35.69%), lignin (12.54-25.70%), holocellulose (26.78-37.17%) and of  $\alpha$ -cellulose (19.45-27.94%). As for the kraft pulping the highest yield was 25.34% with 10% reactive load. The optimal values of the variables kraft pulping response were as follows: rejections 0.03%, 21.18 kappa number and ash content 6.48%. Quality indices pulp indicates that *E. crassipes* kraft pulp is excellent for paper. With the bleaching sequence was obtained O<sub>1</sub>O<sub>2</sub>D<sub>1</sub>(PO)D<sub>2</sub>HD<sub>3</sub> low percentage of whiteness 57.96%. The physical-mechanical properties of standard kraft pulp sheets *E. crassipes* were lower compared industrial pulp *Pinus* spp. As for the mixture Lirio-Pino 20-80% strength properties are greater industrial pulp *Pinus* spp, and approximately 30-70% Lirio-Pino has similar properties. It is concluded that the biomass of *Eichhornia crassipes* can supplement in certain amounts to the cellulosic fibers for handmade paper.

**Keywords:** *Eichhornia crassipes*, kraft pulp, pulp industry, mixtures Lirio-Pino.

## RESUMEN

La biomasa de *Eichhornia crassipes* fue colectada en el lago de Cuitzeo, Michoacán, México, se evaluó el contenido de humedad, densidad y los componentes químicos de la planta, raíz, tallo y hojas (pH, cenizas y su microanálisis, extraíbles, lignina, holocelulosa y  $\alpha$ -celulosa). Se obtuvo pulpa kraft y se caracterizó la morfología e índices de calidad de la pulpa celulósica, además se realizó el blanqueo de la pulpa mediante la secuencia  $O_1O_2D_1(PO)D_2HD_3$ . Para evaluar la calidad de la pulpa kraft se determinaron las propiedades físico-mecánicas; gramaje, espesor, porosidad, índice de tensión, índice explosión, índice de rasgado, doblez, opacidad y blancura en hojas estándar de pulpa café y blanqueada de *E. crassipes*, pulpa industrial de *Pinus* spp y mezclas Lirio-Pino 20-80, 40-60, 60-40 y 80-20%. El contenido de humedad a través de la planta osciló de 85.34 a 93.61%, los valores de pH fueron cercanos al valor neutro, se encontraron elevadas cantidades de cenizas que variaron de 14.37 a 20.78%, en el microanálisis de las cenizas se detectaron los siguientes elementos: K, Cl, Ca, Na, Mg, Si, Al, P, S, Mn, Fe y Ti. Los componentes químicos mayoritarios variaron como sigue: extraíbles (21.82-35.69%), lignina (12.54-25.70%), holocelulosa (26.78-37.17%) y  $\alpha$ -celulosa (19.45-27.94%). En cuanto al pulpeo kraft el mayor rendimiento fue de 25.34% y se obtuvo a 10% de carga de reactivos. Los valores óptimos de las variables de respuesta del pulpeo kraft fueron los siguientes: rechazos 0.03%, Número de kappa 21.18 y contenido de cenizas 6.48%. Los índices de calidad de la pulpa indican que la pulpa kraft de *E. crassipes* es excelente para papel. Con la secuencia de blanqueo  $O_1O_2D_1(PO)D_2HD_3$  se obtuvo bajo porcentaje de blancura 57.96%. Las propiedades físico-mecánicas de las hojas estándar de la pulpa kraft de *E. crassipes* fueron menores a comparación de la pulpa industrial de *Pinus* spp. En cuanto a las mezcla Lirio-Pino 20-80% las propiedades de resistencia son mayores a la pulpa industrial de *Pinus* spp, y aproximadamente a 30-70% Lirio-Pino presenta propiedades similares. Se concluye que la biomasa de *Eichhornia crassipes* puede complementar en ciertas cantidades a las fibras celulósicas para papel artesanal.

Palabras clave: *Eichhornia crassipes*, pulpa kraft, pulpa industrial, mezclas Lirio-Pino.

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad de Guadalajara a través del Departamento de Madera, Celulosa y Papel “Ing. Agustín Grellman” donde se realizaron los ensayos para el evaluar las calidad la pulpa celulósica y el papel.

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo a través de la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, por la oportunidad de realizar mis estudios de posgrado.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología CONACYT por el apoyo otorgado durante el periodo de mis estudios de posgrado.

## 1. INTRODUCCIÓN

La producción de celulosa y papel se basa casi exclusivamente en la madera (Paz *et al.*, 2011). Sin embargo, una creciente demanda de papel combinada con una disminución de la oferta de fibra de los bosques del mundo está obligando a la industria de la celulosa y papel a encontrar técnica y económicamente fuentes viables de fibras para complementar los recursos forestales (Jahan *et al.*, 2008). La producción de papel y cartón en el mundo ha aumentado; en el año 2009 fue de 371 millones de toneladas y en el año 2013 de 398 millones de toneladas (FAO, 2014). La escasez mundial de recursos fibrosos ha despertado un gran interés en la utilización de materias primas fibrosas no convencionales (malezas, arbustos y no maderables), susceptibles de utilizarse para la obtención de celulosa y su aplicación en papel (Nagaty *et al.*, 1982; Agarwal *et al.*, 1992; Atchison, 1996; Escoto *et al.*, 2013).

Dentro de toda esta diversidad, *Eichhornia crassipes* es una planta acuática, flotante nativa de la cuenca del Amazonas en Brasil (Parolin *et al.*, 2012). Es una planta acuática invasiva que se ha extendido ampliamente en el mundo en regiones tropicales y subtropicales (Villamagna y Murphy, 2010). Puede propagarse rápidamente y tiene una proliferación extremadamente rápida (Malik, 2007). La biomasa de esta planta aumenta en un día 1 kg/m<sup>2</sup>, que asciende a 1.800-2700 toneladas de materia prima húmeda ó 90-135 toneladas de peso absolutamente seco por una

hectárea (Shoyakubov y Aitmetova 1999); en 5 días duplica su tamaño en una área cubierta (Malik, 2007), en 12 días la biomasa se duplica (Parolin *et al.*, 2012), entre 4 y 58 días se duplica en número (Epstein, 1998). Una alfombra de plantas de tamaño medio puede contener 2.000.000 plantas por hectárea que pesan 270 - 400 toneladas (Malik, 2007), en 6 meses se producen 125 toneladas peso húmedo en una área de 1 ha (Istirokhatun *et al.*, 2015). Se ha reportado que esta planta invasora causa impactos ecológicos y económicos graves, como pérdida de la diversidad e hibridación de especies nativas, alteraciones en los procesos del ecosistema, y un aumento de las plagas y enfermedades además serios desafíos en la navegación y la irrigación (Rodríguez, 2006; Villamagna y Murphy, 2010; Mahamadi, 2011; Stiers *et al.*, 2011; Nguyen *et al.*, 2015).

Ahora bien, debido a que *Eichhornia crassipes* tiene una rápida proliferación, propagación, y es considerada una amenaza a la biodiversidad (Istirokhatun *et al.*, 2015; Tan *et al.*, 2015), urge emplear esta maleza acuática, además aunado ante un incremento en la demanda de mayor producción de pulpa destinada a la elaboración de papel y una reducción de costos en la industria, resulta importante determinar la composición química de la planta, obtener pulpa kraft y evaluar las propiedades físico-mecánicas de hojas estándar de papel de esta maleza acuática que pudiera complementar los recursos maderables celulósicos, como materia prima alternativa en la industria de celulosa y papel.

## 2. ANTECEDENTES

### 2.1. Antecedentes de *Eichhornia crassipes* como material lignocelulósico

**Tabla 1.** Antecedentes de *Eichhornia crassipes* como material lignocelulósico

Joedodibrotto <i>et al.</i> (1983)	Estudiaron los usos potenciales de algunas hierbas acuáticas como pulpa para papel, donde incluyeron a <i>E. crassipes</i> y determinaron sus componentes químicos en raíz y hojas.
Shoyakubov y Aitmetova (1999)	Determinaron los componentes químicos de <i>Eichhornia crassipes</i> y <i>Pistia stratiotes</i>
Kumar <i>et al.</i> (2009)	Realizaron bioconversión de la fracción lignocelulósica a partir <i>E. crassipes</i> mediante hidrólisis de hemicelulosas, también determinaron componentes químicos.
Chandel y Singh (2011)	Recabaron información sobre los materiales lignocelulósicos más abundantes, disponibles y renovables en la tierra donde se consideró a <i>E. crassipes</i> .
Dantas <i>et al.</i> (2012)	Investigaron la presencia de polisacáridos sulfatados, donde caracterizaron la humedad y componentes químicos en raíz, rizoma, peciolo y hojas de <i>E. crassipes</i> .
Fileto <i>et al.</i> (2013)	Evaluaron a <i>E. crassipes</i> como una materia prima alternativa para la producción de azúcares, y su composición química.
Jayanthi y Lalitha (2013)	Evaluaron métodos de extracción y rendimientos de extraíbles
Reales <i>et al.</i> (2013)	Realizaron hidrólisis ácida del lirio para obtener azúcares fermentables, también reportan el contenido de humedad y componentes químicos.
Fileto <i>et al.</i> (2015)	Analizaron los extraíbles de hojas, raíces y tallos de <i>E. crassipes</i> , como una fuente de compuestos bioactivos.

## 2.2. Antecedentes sobre pulpa celulósica a partir de *Eichhornia crassipes*.

**Tabla 2.** Antecedentes sobre pulpa celulósica a partir de *Eichhornia crassipes*.

Bagnall <i>et al.</i> (1974)	Han propuesto a <i>E. crassipes</i> como: absorbente de nutrientes en aguas residuales tratadas, alimento para forraje, composta y para elaborar papel.
Nolan y Kirmse (1974)	Obtuvieron pulpa a partir de <i>E. crassipes</i> mediante cuatro procesos en el que se encuentra el kraft; evaluaron solamente algunas propiedades del papel.
Widyanto <i>et al.</i> (1983)	Concluyeron que el lirio puede proporcionar funciones dobles en una fábrica de papel, la primera como absorbente de contaminantes, el segundo ser cosechado para complementar materia prima de pulpa para papel.
Joedodibroto <i>et al.</i> (1983)	Realizaron la morfología de las fibras, pulpeo con NaOH y blanqueo con cloro.
Atanu <i>et al.</i> (2013)	Proponen a <i>E. crassipes</i> como una materia prima alternativa para la industria de celulosa y papel, utilizando el proceso de pulpeo kraft; sólo evaluaron algunas propiedades de la pulpa sin realizar curva de refinación.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1. Objetivo general**

Evaluar la calidad de la pulpa kraft de *Eichhornia crassipes*

#### **3.2. Objetivos específicos**

- ❖ Determinar las propiedades físicas y químicas de la biomasa de *E. crassipes*.
- ❖ Realizar el pulpeo Kraft, morfología e índices de calidad de la pulpa celulósica.
- ❖ Obtener blanqueo de la pulpa kraft mediante la secuencia O<sub>1</sub>O<sub>2</sub>D<sub>1</sub>(PO)D<sub>2</sub>HD<sub>3</sub>
- ❖ Determinar las propiedades físico-mecánicas en hojas estándar de pulpa café y blanqueada de *E. crassipes*, pulpa industrial de *Pinus* spp y mezclas Lirio-Pino.

### **4. HIPÓTESIS**

Las propiedades físico-mecánicas de la pulpa kraft de *Eichhornia crassipes* pudieran ser adecuadas para fabricar papel, con características similares o mejores a la pulpa celulósica obtenida de madera.

## 5. JUSTIFICACIÓN

*Eichhornia crassipes* no tiene uso comercial y en la mayoría de los casos se mantiene en proliferación. Se ha reportado que esta planta invasora causa impactos ecológicos y económicos graves, como pérdida de la diversidad de especies e hibridación con especies nativas, alteraciones en los procesos del ecosistema, y un aumento de plagas y enfermedades además serios desafíos en la navegación y la irrigación (Rodríguez, 2006; Villamagna y Murphy, 2010; Mahamadi, 2011; Stiers *et al.*, 2011; Nguyen *et al.*, 2015).

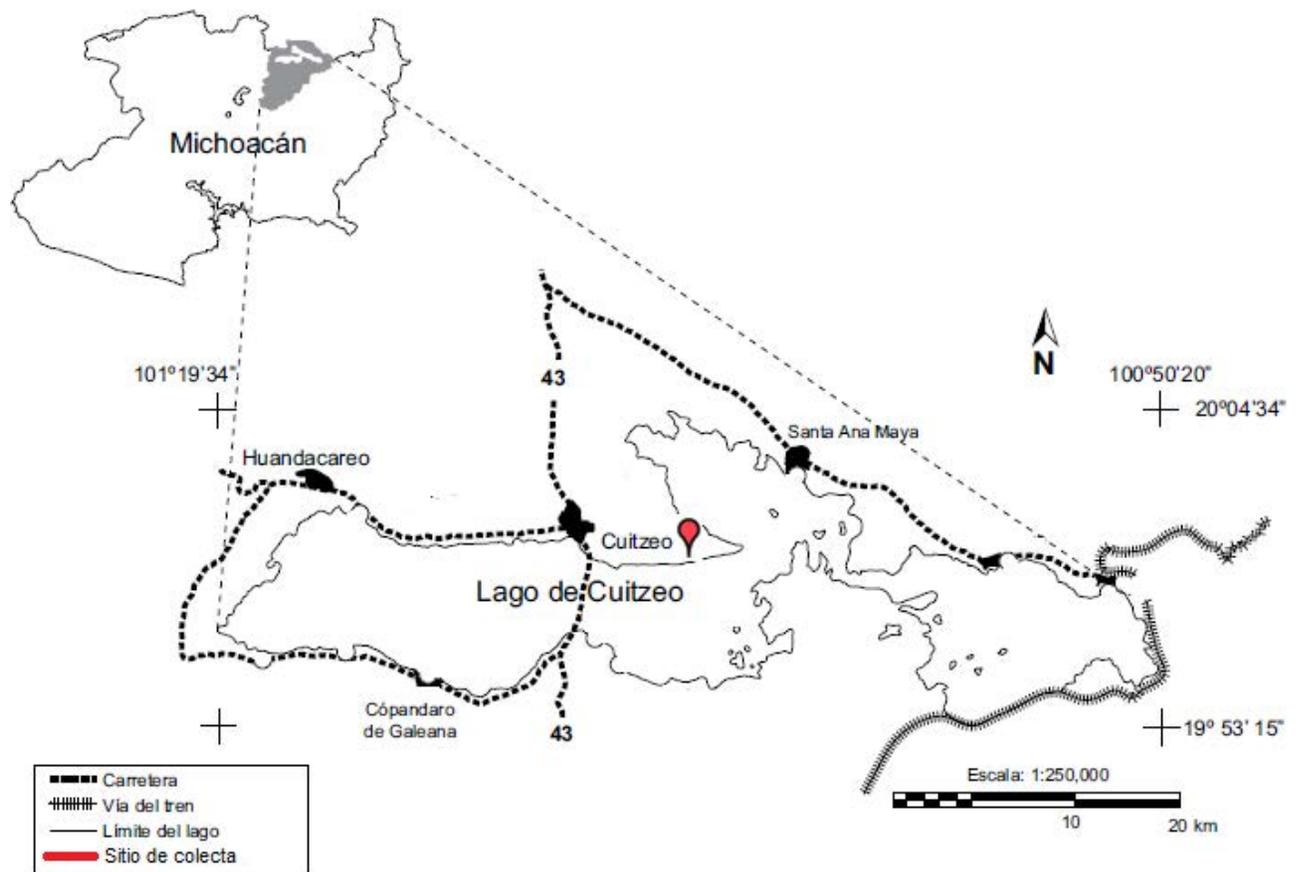
El lirio acuático es una de las plantas más productoras en la tierra y tiene una proliferación extremadamente rápida, una fuerte capacidad de propagación. Además, su biomasa aumenta hasta 1 kg/m<sup>2</sup> por día (Shoyakubov y Aitmetova 1999). Según Malik (2007) el lirio acuático puede duplicar su tamaño (área cubierta) en 5 días. Parolin *et al.*, (2012) detallan que en condiciones favorables en tan sólo 12 días la biomasa del lirio se duplica. Gopal (1987), Epstein (1998) y Malik (2007) señalan que entre 6 y 28 días se duplica en peso, y entre 4 y 58 días se duplicará en número basado en mediciones de campo; y una alfombra de plantas de tamaño medio pueden contener 2.000.000 plantas por hectárea que pesan 270 - 400 toneladas. En 6 meses alcanza 125 toneladas de peso húmedo en una área de 1 ha (Istirokhatun *et al.*, 2015).

Debido a que dicha planta acuática es considerada una amenaza a la biodiversidad (Tan, 2015), su alto índice de proliferación y propagación (Gopal 1984; Bricker *et al.*, 1999 y Malik, 2007), fuente de carbohidratos y bajo contenido de lignina (Gressel 2008; Atanu *et al.*, 2013; Fileto *et al.*, 2013 y Istirokhatun *et al.*, 2015), resulta importante realizar este estudio sobre la obtención de pulpa kraft y la evaluación físicomecánica de las hojas estándar, cuyos resultados esperados pudieran dar pauta para considerarla como una fuente alternativa para la producción de pulpa celulósica.

## 6. METODOLOGÍA

### 6.1. Recolección del material de estudio

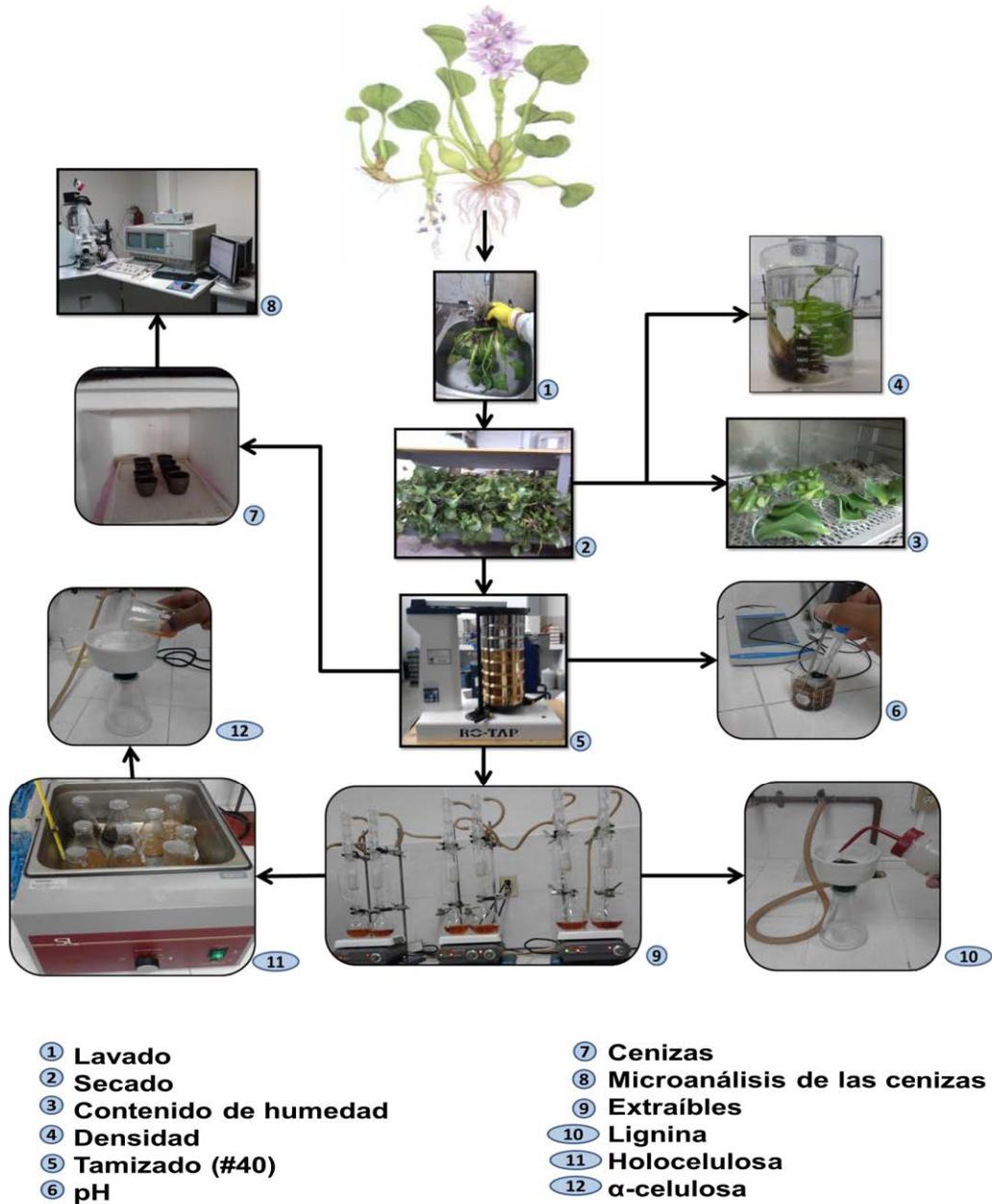
La colecta de *Eichhornia crassipes* se realizó en el Lago de Cuitzeo en la localidad de Mariano Escobedo situado en el Municipio de Cuitzeo en el Estado de Michoacán, México. Este lago se ubica geográficamente entre los paralelos 19°53'15" y 20°04'34" de latitud Norte y entre los meridianos 100°50'20" y 101°19'34" de longitud Oeste del Meridiano de Greenwich (Figura 1) (Alvarado *et al.*, 1984).



**Figura 1.** Ubicación geográfica del sitio de la colecta de *Eichhornia crassipes* (Sánchez y Guevara, 2013).

## 6.2. Propiedades físicas y químicas de la biomasa de *Eichhornia crassipes*.

En la figura 2 se presenta un panorama general sobre la metodología aplicada.



**Figura 2.** Diagrama de metodologías de las propiedades físicas y químicas de la biomasa de *Eichhornia crassipes*.

### 6.2.1. Preparación de la biomasa de *Eichhornia crassipes*

Las plantas acuáticas se lavaron con abundante agua a corriente constante para limpiarlas de la tierra, peces, conchas piedras pequeñas entre otros y poder determinar sus propiedades físicas, posteriormente se dejaron secar al aire libre bajo sombra. Una vez que las plantas acuáticas contaban con una humedad aproximada de 12%, los especímenes de *E. crassipes* se clasificaron por: plantas completas, raíces, tallos y hojas, estos materiales se molieron con un molino Wiley, y se tamizaron para obtener cuatro fracciones (malla 20, 40, 60 y finos) y la malla 40 (425 micrones poros) se utilizó para determinar sus propiedades químicas.

### 6.2.2. Contenido de humedad

La humedad inicial se determinó en la planta completa, raíz, tallo y hojas mediante el procedimiento de deshidratación en horno de secado a 105 °C ±3.

### 6.2.3. Densidad

La densidad se determinó mediante el principio de Arquímedes. La densidad de *E. crassipes* se determinó a un 92.75% de humedad inicial, primero se registró la masa de la planta en g, después se sumergió en un volumen conocido g/cm<sup>3</sup>. La densidad se determinó en base a la ecuación de la densidad.

### 6.2.4. pH

La determinación del pH se basó en el método de Sandermann y Rothkamm (1959); 2 g de harina sin extraer se colocaron en un vaso de precipitados con 20 ml de agua destilada, se registró la lectura inicial de pH con un potenciómetro marca HANNA y se volvió a tomar a los 5 minutos, 4 h, 24 h y a las 48 h de iniciada la medición.

### 6.2.5. Cenizas

El contenido de cenizas se efectuó de acuerdo con la norma T 211 om-93 (TAPPI, 2000); se calcularon gravimétricamente, después de quemar cuidadosamente 2 g de harina de la planta y sus secciones sin extraer en un crisol de níquel, previamente tarado, sobre una placa de calentamiento hasta el cese de desprendimiento de humo, para su posterior calcinación en una mufla a 525 °C; el proceso se dio por concluido hasta que el crisol tuvo peso constante.

#### 6.2.6. Microanálisis de las cenizas

Para la identificación de los elementos presentes en las cenizas se realizó su microanálisis en un espectrómetro de Rayos X, acoplado a un Microscopio Electrónico de Barrido marca Jeol modelo JSM-6400. Las condiciones de operación para los análisis fueron 20 kV y 8,5 segundos (Téllez *et al.*, 2010), obteniéndose los espectros respectivos en puntos aleatorios eliminándose el carbono y oxígeno.

#### 6.2.7. Extraíbles.

Para la obtención de los extraíbles con disolventes orgánicos se realizaron extracciones secuenciales en equipo Soxhlet con los siguientes disolventes: ciclohexano, acetona, metanol, y, finalmente, agua caliente a ebullición bajo reflujo (durante 6 h en cada caso). Los disolventes se recuperaron en un rotavapor aplicando vacío y los extraíbles respectivos se llevaron a un desecador hasta peso constante. El contenido de extraíbles para cada solvente se calculó dividiendo el peso del extraíble anhidro entre el peso de la harina anhidra de lirio referido porcentualmente. Los extraíbles totales se calcularon con la suma de los porcentajes de los extraíbles de cada solvente. La harina del lirio acuático, después de la extracción sucesiva, se designó como harina libre de extraíbles y se empleó para determinar lignina y holocelulosa.

#### 6.2.8. Lignina

El contenido de lignina en la harina de lirio libre de extraíbles se determinó de conformidad con la técnica Runkel y Wilke (1951). A 1 g de harina libre de extraíbles se le adicionaron 50 ml de ácido sulfúrico al 72% y 50 ml de ácido bromhídrico al 40%, agitándola y dejándola reposar por 2 horas. Posteriormente, se le agregaron 200 ml de agua destilada y se llevó a ebullición por 5 minutos. Finalmente, se filtró y las muestras se lavaron en repetidas ocasiones hasta eliminar los residuos de ácido. Para finalizar se llevaron a peso constante en un horno a 103 °C. El contenido de lignina se calculó dividiendo el peso de la muestra anhidra entre el peso de la harina libre de extraíbles anhidra referido porcentualmente.

#### 6.2.9. Holocelulosa.

Se cuantificó el contenido de holocelulosa empleando clorito de sodio de acuerdo con el procedimiento de Wise *et al.* (1946). En un vaso de precipitados se vertieron 32 ml de agua destilada a 1 g de harina libre de extraíbles, entonces se adicionaron 0,3 g de clorito de sodio y 2 gotas de ácido acético glacial y la muestra se llevó a un baño de agua a 75 °C. La adición de clorito de sodio y ácido acético glacial, en las cantidades ya indicadas, se repitió cíclicamente cada hora, por un periodo total de 4 horas. Después de la cloración, la solución fue filtrada, lavada con 100 ml de agua fría, seguida de 10 ml de acetona; el

residuo fue llevado a un horno convencional a 40 °C hasta peso constante. El contenido de holocelulosa se calculó dividiendo el peso del residuo anhidro entre el peso de la harina libre de extraíbles anhidra referido porcentualmente.

#### 6.2.10. Alfa-celulosa

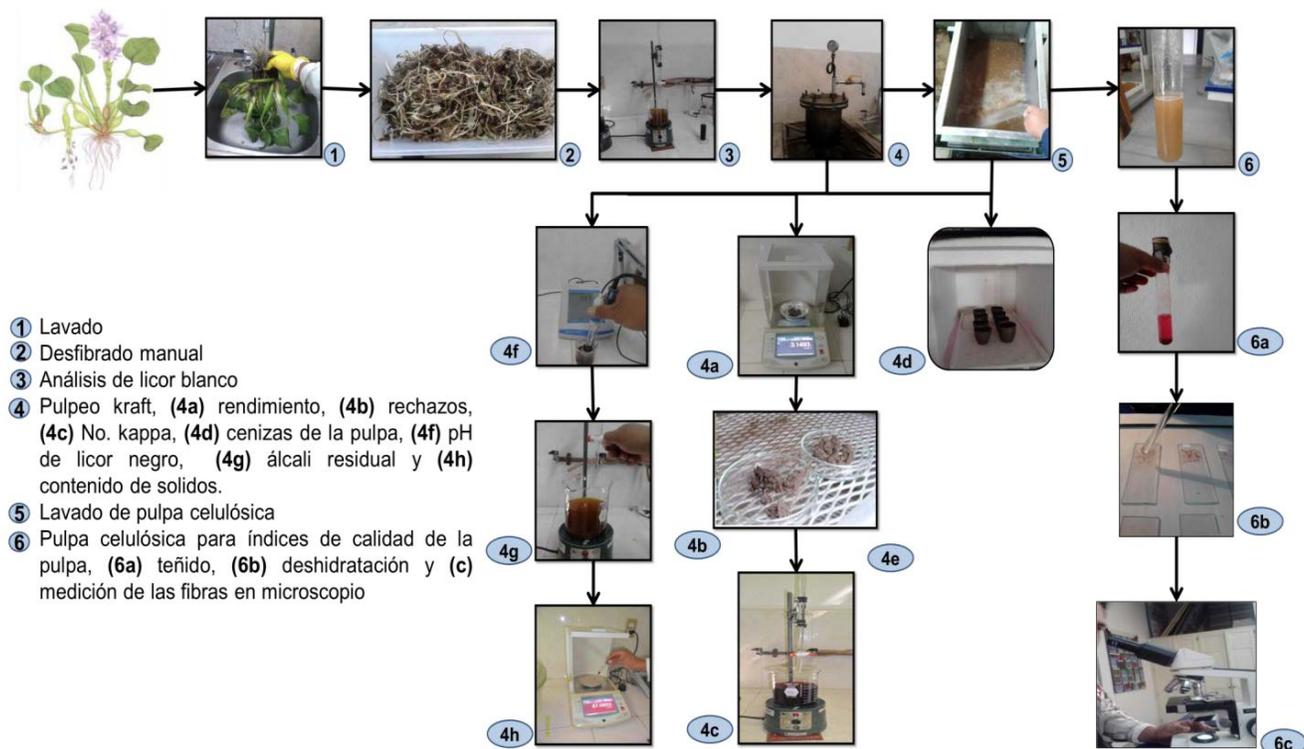
El contenido de  $\alpha$ -celosa se obtuvo mediante la norma D 1103-60 (ASTM 1978); mediante harina de holocelulosa de planta, raíz, tallo y hojas, se inició agregando 1 g de holocelulosa en un vaso de precipitados de 50 ml donde se agregaron 5 ml de Hidróxido de sodio (NaOH) al 17.5% se dejó 5 minutos en reposo, enseguida se agregaron 2.5 ml de NaOH más 5 min de reposo después se agregaron nuevamente 2.5 ml de NaOH se dejó otros 5 min en reposo para después agregar 2.5 ml de NaOH al 17.5%, se pasó a agregar 16.5 ml de agua destilada se dejó en reposo durante 1 H. se realizó un filtrado y lavado con 50 ml de NaOH al 8.3% para cada una de las muestras, posteriormente se realizó otro lavado con agua destilada para seguir lavando con 7.5 ml de ácido acético al 10% se dejó en reposo durante 3 minutos, finalmente se realizó un lavado con agua destilada hasta neutralizar cada una de las muestras, se dejó secar a peso contante a una temperatura de 102°C. El contenido de alfa-celulosa se calculó dividiendo el peso del residuo anhidro entre el peso de la holocelulosa anhidra referido porcentualmente.

#### Análisis estadístico

Se realizó un análisis de comparación de medias con una ANOVA simple y una prueba de tukey con  $\alpha=0.05$  de acuerdo al paquete estadístico Statistica 7.

### 6.3. Pulpeo Kraft, morfología e índices de calidad de la pulpa celulósica

En la figura 3 se aprecia de manera general la metodología aplicada para el proceso de pulpeo, y la morfología e índices de calidad de la pulpa.



**Figura 3.** Diagrama de la metodología de pulpeo kraft sus variables de respuesta, e índices de calidad de la pulpa celulósica

#### 6.3.1. Preparación del material

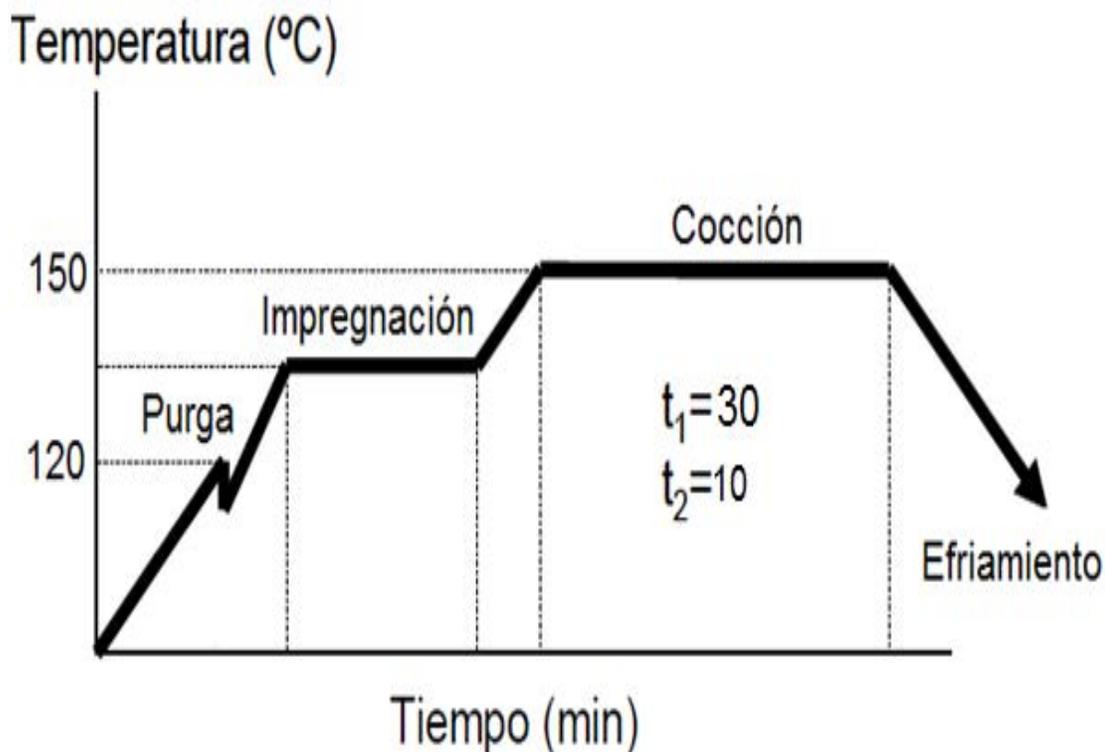
El material lignocelulósico se secó bajo sombra, después menor cantidad de humedad se desfibró de forma manual toda la planta completa de *E. crassipes*.

#### 6.3.2. Análisis del licor blanco

El análisis del licor blanco se evaluó mediante el método potenciométrico (Sanjuán, s/f), el álcali activo y la sulfidez del licor blanco se presentan en la tabla 3.

### 6.3.3. Cocción Kraft

La cocción de la pulpa celulósica se obtuvo mediante el proceso kraft y se realizó de acuerdo con el procedimiento que se ejemplifica de manera general en la figura 4, en un digestor convencional.



**Figura 4.** Diagrama del proceso para las cocciones del pulpeo kraft.

Para el proceso de pulpeo se aplicó un diseño factorial  $2^2$  para 10 y 20% de carga de reactivos (Gutiérrez y de la Vara, 2004), con un punto central, teniendo como factores y niveles los siguientes:

Factor A: Temperatura (120 y 150 °C)

Factor B: Tiempo de cocción a  $T_{m\acute{a}x}$  (10 y 30 min)

Las condiciones de proceso de pulpeo se presentan en la tabla 3. Las variables de respuesta de la pulpa son: rendimiento, rechazos, número de kappa, contenido de cenizas en la pulpa, y para el licor negro residual: pH, álcali residual y contenido de sólidos.

Los resultados se analizaron en el software statgraphics versión 4 plus a un 95% de confianza estadística,  $\alpha=0.05$ .

**Tabla 3.** Diseño experimental para la cocción de pulpeo kraft de *Eichhornia crassipes*.

No. Exp.	Carga de reactivos (%)	Relación de baño	Álcali activo (g/ml)	Sulfidez (%)	Temp. (°C)	Tiempo (min.)
1	10	12:1	100	26	150	10
2	10	12:1	100	26	135	20
3	10	12:1	100	26	120	10
4	10	12:1	100	26	120	30
5	10	12:1	100	26	150	30
6	20	12:1	100	26	150	10
7	20	12:1	100	26	135	20
8	20	12:1	100	26	120	10
9	20	12:1	100	26	120	30
10	20	12:1	100	26	150	30

#### 6.3.4. Morfología e índices de calidad de la pulpa celulósica

Las fibras celulósicas se obtuvieron de la cocción kraft con las condiciones del experimento No.4 que se presenta en la tabla 3, una vez lavada y depurada la pulpa, se llevó a cabo el teñido del material fibroso con pardo de Bismark durante media hora, enseguida se dispersó el material sobre un portaobjeto, con ayuda de un pincel, para después llevar a cabo una deshidratación del material durante 48 horas a medio ambiente, una vez deshidratadas las fibras se sometieron a un aclareo con xilol y con una capa de resina sintética, de acuerdo con la metodología descrita por Guridi y García (2000).

Para medir las fibras (longitud de la fibra objetivo 10x, diámetro de la fibra, grosor de la pared y diámetro de lumen con objetivo 40x) se utilizó un microscopio óptico con reglilla milimetrada incluida en el ocular. Las mediciones de las muestras fueron mayores a 80 para cada una de las dimensiones de la fibra.

Los índices de calidad de pulpa para papel se obtuvieron de los datos mensurables promedio obtenidos de la longitud de la fibra, diámetro total de la fibra, diámetro del lumen y espesor de la pared celular. La clasificación de los índices de calidad de pulpa celulósica de *Eichhornia crassipes* se realizó de acuerdo a la clasificación de Runkel, presentada por Petroff y Nordmand (1968) y por Porres y Valladares (1979).

### 6.3.5. Lavado, depurado, centrifugado y homogenizado de la pulpa café.

La pulpa se lavó con agua corriente en un tamiz de malla 325, la depuración se realizó en un equipo de diafragma con abertura de 0.40mm. Finalmente la pulpa depurada se centrifugo durante 5 minutos y se homogenizo durante 10 minutos, como se indica en la figura 5.

### 6.3.6. Caracterización de la pulpa café kraft de *Eichhornia crassipes* y de pulpa café kraft de *Pinus spp* proveniente de la Compañía Papelera de Atenquique, S.A. de C.V. en Jalisco, México.

La caracterización de la pulpa café se realizó en base a las técnicas que se indican en la tabla 4 y en base al procedimiento descrito en la figura 5.

**Tabla 4.** Técnicas utilizadas para caracterizar la pulpa café kraft.

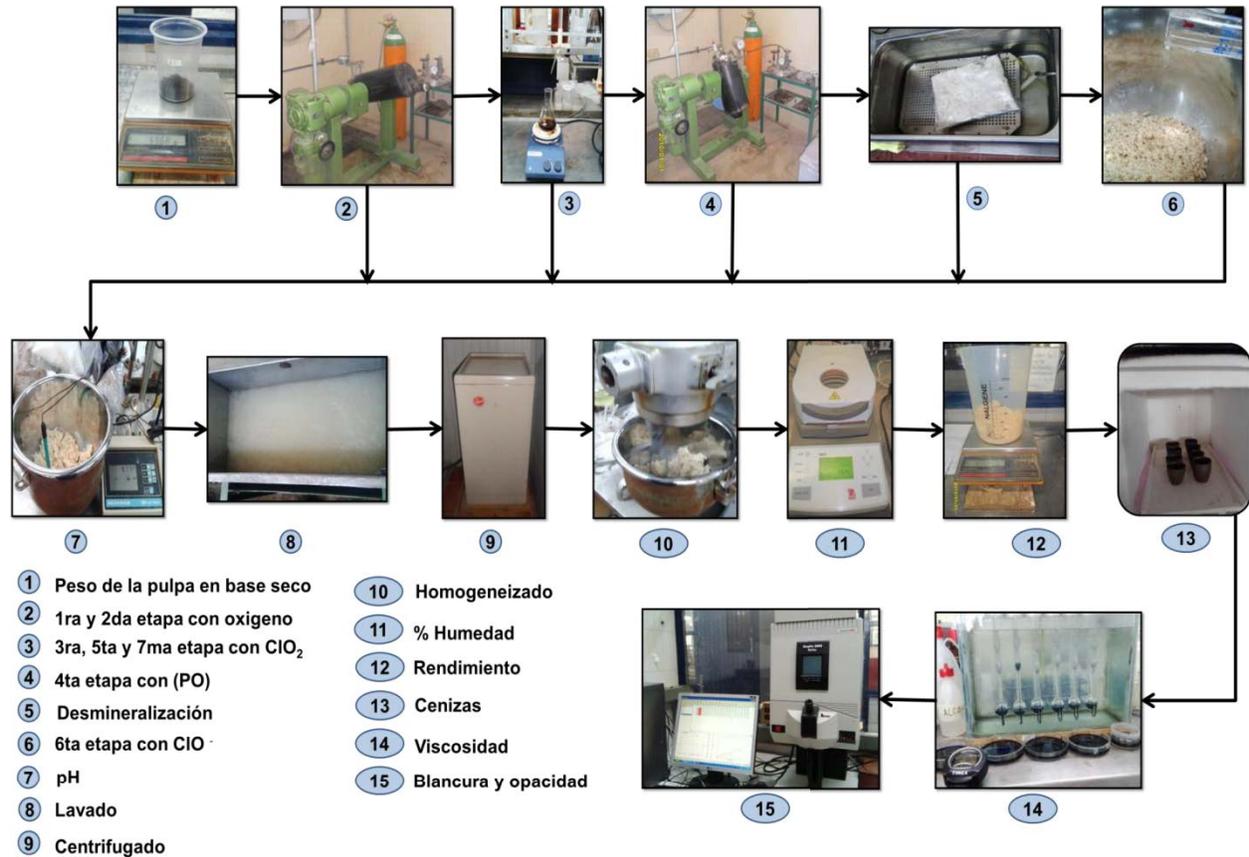
Técnica	Análisis
T 412 om-94	Humedad
Gravimétricamente	Rendimiento
Gravimétricamente	Rechazos
T 236 cm-85	No. de kappa
T 413 om-93	Cenizas
T 233 cm-95	Clasificación de fibras
SCAN-CM 15:88	Viscosidad



**Figura 5.** Diagrama de la metodología para la caracterización de la pulpa café

#### 6.4. Blanqueo de la pulpa kraft mediante la secuencia O<sub>1</sub>O<sub>2</sub>D<sub>1</sub>(PO)D<sub>2</sub>HD<sub>3</sub>

La pulpa café de lirio acuático se sometió a un proceso de blanqueo mediante la secuencia O<sub>1</sub>O<sub>2</sub>D<sub>1</sub>(PO)D<sub>2</sub>HD<sub>3</sub> con el procedimiento descrito en la figura 6 en y bajo las condiciones de la tabla 5. La letras de la secuencia de blanqueo abrevian lo siguiente: O (oxígeno), D (dióxido de cloro), PO (peróxido- oxígeno), y H (hipoclorito).



**Figura 6.** Diagrama de las etapas de blanqueo de la pulpa café mediante la secuencia O<sub>1</sub>O<sub>2</sub>D<sub>1</sub>(PO)D<sub>2</sub>HD<sub>3</sub>.

**Tabla 5.** Condiciones de operación del proceso de blanqueo mediante la secuencia O<sub>1</sub>O<sub>2</sub>D<sub>1</sub>(PO)D<sub>2</sub>HD<sub>3</sub>.

Condiciones	O <sub>1</sub>	O <sub>2</sub>	D <sub>1</sub>	PO	D <sub>2</sub>	Desm	H	D <sub>3</sub>
Pulpa base seca inicial (g)	357.04	234.07	164.95	130.96	106.02	82.43	72.79	63.91
Presión de oxígeno (kg/cm <sup>2</sup> )	5	5	--	5	--	--	--	--
Sosa (%)	4	5	--	0.5	--	--	0.2	--
Sulfato de magnesio (%)	0.5	0.5	--	0.5	--	--	--	--
Peróxido (%)	--	--		3	--		--	
Dióxido de cloro (%)	--	--	2.55		3	--	--	1.5
Ácido sulfúrico (ml)	--	--	--	--	--	19.5	--	0.2
Hipoclorito de sodio (%)	--	--	--	--	--	--	2	--
Consistencia (%)	10	10	10	10	10	10	10	10
Temperatura (°C)	100	100	80	100	80	80	40	70
Tiempo (minutos)	60	60	60	90	180	60	180	180
pH inicial	11.28	11.42	4.91	11.06	3	3.04	11.04	4.40

Desm= Desmineralización

#### 6.4.1. Lavado, centrifugado y homogenizado de la pulpa después de cada etapa.

Después de cada etapa de blanqueo la pulpa se lavó, centrifugo y homogeneizo de la misma manera que para el caso de la pulpa café Kraft, y como se describe gráficamente en la figura 6.

#### 6.4.2. Caracterización de la pulpa blanqueada

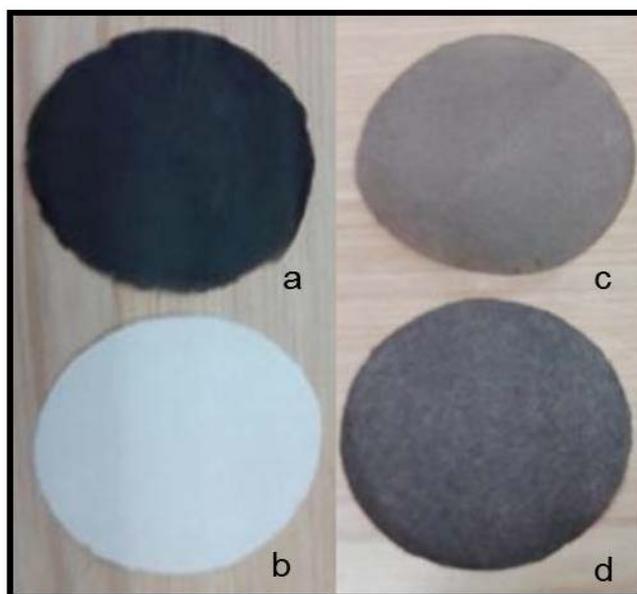
La caracterización de la pulpa celulósica después de cada etapa de blanqueo se realizó en base a las técnicas que se indican en la tabla 6.

**Tabla 6.** Técnicas utilizadas para caracterizar la pulpa blanqueada

Técnica	Análisis
T 412 om-94	Humedad
Gravimétricamente	Rendimiento
T 236 cm-85	No. de kappa
T 211 cm-93	Cenizas
SCAN-CM 15:88	Viscosidad
T 519 0M-96	Opacidad
T 452 om-98	Blancura

### 6.5. Evaluación de las propiedades físico mecánicas en hojas estándar de pulpa café y blanqueada de *E. crassipes*, pulpa industrial de *Pinus* spp y mezclas Lirio-Pino.

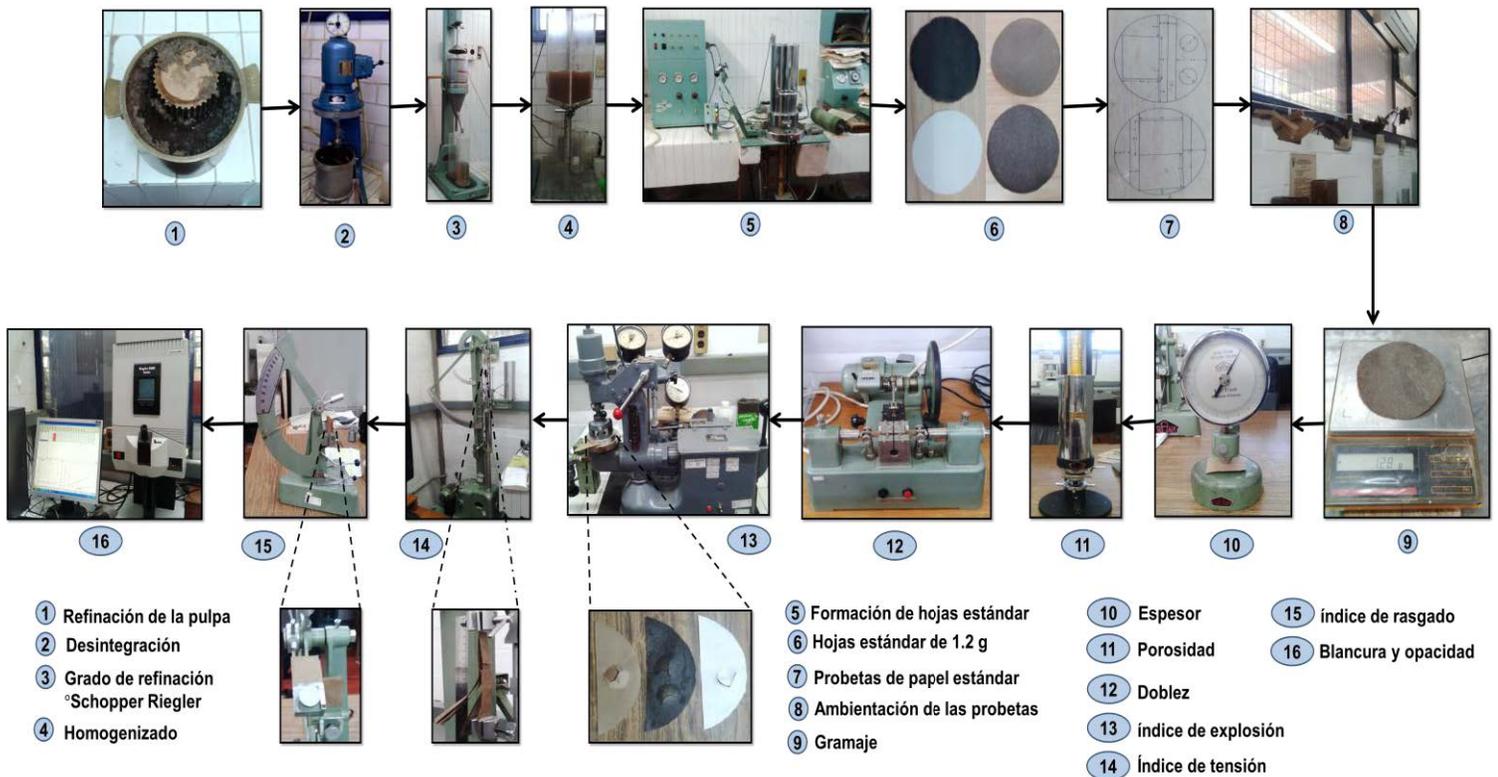
Se evaluaron las propiedades físicomecánicas de hojas estándar de un gramaje de 59.68 (g/m<sup>2</sup>) de pulpa café kraft y blanqueada de *Eichhornia crassipes* y de pulpa café kraft de *Pinus* spp proveniente de la Compañía Papelera de Atenquique, S.A. de C.V. en Jalisco, México. Además después de evaluar la curva de refinación de las pulpas kraft de *E. crassipes* y *Pinus* spp, y tomando en cuenta los puntos óptimos de refinación se realizaron mezclas de pulpas celulósicas sin refinar y refinadas y se realizaron hojas estándar de 59.68 g/m<sup>2</sup> de las mezclas de Lirio-Pino con los siguientes porcentajes de adición: 20-80, 40-60, 60-40 y 80-20% (Figura 7).



**Figura 7.** Hojas estándar de 1.2g (59.68 g/m<sup>2</sup>), **a)** hoja de pulpa kraft de *Eichhornia crassipes*, **b)** hoja de pulpa blanqueada de *E. crassipes*, **c)** hoja de pulpa kraft industrial de *Pinus* spp, **d)** Hoja de mezcla Lirio-Pino.

#### 6.5.1. Refinación de la pulpa

El proceso de refinación de la pulpa se hizo a 5 puntos y de acuerdo al método relativo a ISO 5264/3 como se indica en la figura 8. Los puntos de refinación de *E. crassipes* fueron 0, 2.5, 5, 7.5 y 10 minutos, para la pulpa industrial de *Pinus* spp 0, 20, 40, 60 y 80 minutos y para la mezclas Lirio-Pino sólo se refino la pulpa de *Pinus* spp a 40 minutos.



**Figura 8.** Diagrama de las propiedades físico-mecánicas de hojas estándar sin blanquear y blanqueadas de *Eichhornia crassipes*, pulpa industrial de *Pinus spp* y mezclas Lirio-Pino.

### 6.5.2. Grado de refinación

La medición de grado de refinación se realizó en grados Schopper Riegler según el método relativo a ISO 5267 como se indica en la figura 8.

### 6.5.3. Formación de hojas estándar

Las hojas estándar con pulpa café y pulpa blanqueada de *E. crassipes*, pulpa industrial de *Pinus spp* y las mezclas Lirio-Pino se realizaron de 59.68 g/m<sup>2</sup>, y de todos los puntos de refinación, se formarán de acuerdo al método relativo a ISO 5269/1 y T 205 om-88 (TAPPI, 2000) y como se indica gráficamente en la figura 8.

### 6.5.4. Pruebas físico-mecánicas de las hojas estándar

La caracterización físico-mecánica de las hojas estándar de 59.68 g/m<sup>2</sup> de pulpa café y blanqueada, pulpa industrial de *Pinus spp*, y las mezclas Lirio-Pino; 20-80, 40-60, 60-40 y 80-20% se determinaron, en base a las normas TAPPI (2000) que se indican en la tabla 7 y gráficamente en la figura 8.

**Tabla 7.** Técnicas utilizadas para caracterizar las propiedades físico-mecánicas de la pulpa café kraft y pulpa blanqueada

Técnica	Análisis
T 410 om-93	Gramaje
T 411 om-89	Espesor
T 460 om-88	Porosidad
T 404 cm-92	Índice de ruptura
T 414 om-88	índice de rasgado
T 403 om-97	índice de explosión
T 423 om-07	Doblez
T 519 0M-96	Opacidad
T 525 om-92	blancura

## 7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 7.1. Propiedades físicas y químicas de la biomasa de *Eichhornia crassipes*.

#### 7.1.1. Humedad

El contenido de humedad en planta y tallo fueron estadísticamente iguales, y diferentes en la raíz y la hoja presentó el menor valor de humedad con diferencias significativas (Tabla 8). Los porcentajes obtenidos de humedad en la planta, raíz y tallo en esta investigación son comparables con los reportados en raíz (91.3%), tallo (rizoma 93.2 y peciolo 93.2%), hoja (86.55%) por Dantas *et al.* (2012), y ligeramente menores al 95% reportado para las plantas en otras investigaciones por Kumar *et al.* (2009), Bergier *et al.* (2012), Fileto *et al.* (2013) y por Reales *et al.* (2013). Es conocido que la biomasa de las plantas y hierbas contiene más del 50% de humedad en base a su peso seco, y la humedad intrínseca (agua que forma parte de la estructura de la biomasa) es mucho menor (Tanger *et al.*, 2013). Se ha documentado que puede haber correlaciones significativas entre el contenido de humedad y el contenido mineral de las plantas, ya que utilizan iones minerales para modular el potencial osmótico de las células (Patakas *et al.*, 2002; Arjenaki *et al.*, 2012), por lo tanto el alto contenido de humedad en *Eichhornia crassipes* puede estar relacionado con su alto contenido de minerales (Tabla 8).

#### 7.1.2. Densidad

La densidad verde de *E. crassipes* se presenta en la tabla 8. La densidad de los materiales lignocelulosicos sin considerar el agua, es la expresión de la presencia relativa de los distintos elementos celulares que la componen (vasos, fibras, células de parénquima) y

esta depende del tamaño de las células, del grosor de la pared celular y de la proporción de los diferentes tipos de tejidos con respecto al volumen total del material lignocelulósico (Zobel y Tabert, 1984). La variación del volumen y el peso afectan los costos de transporte; cuanto menor sea la carga los costos de tracción son más altos por unidad del producto suministrado (Sosa *et al.*, 2015). Por lo tanto el conocer la densidad de la materia prima permite que la materia prima sea transportada de forma eficiente desde el sitio de colecta.

**Tabla 8.** Propiedades físicas y químicas de *Eichhornia crassipes* y sus efectos en la industria de celulosa y papel

Análisis	<i>Eichhornia crassipes</i>				Efecto en la industria de pulpa y papel
	planta	raíz	tallo	hoja	
<b>Humedad</b>	92.75 ±0.62 ab	92.71 ±0.34 b	93.61 ±0.23 a	85.34 ±0.34 c	Alto contenido de humedad en las materias primas aumenta el peso de las plantas, por consiguiente aumenta el costo de transporte. Puede influir en la eficiencia de fabricación de la pasta para papel <sup>1</sup> . Bajo contenido de humedad afecta de difusión del licor de cocción, bajo rendimiento, y alto porcentaje de rechazos <sup>8</sup> .
<b>Densidad (kg/cm<sup>3</sup>)</b>	0.51 ±0.18	—	—	—	La alta densidad mejora el rendimiento en la fabricación de la pasta para papel <sup>1</sup> . Alto volumen y el peso afectan a los costos de transporte <sup>7</sup> .
<b>pH</b>	6.52 ±0.11 a	6.82 ±0.06 b	6.53 ±0.16 a	6.31 ±0.01 a	El pH bajo puede afectar entre interacciones con ciertos metales y esto podría causar la corrosión en el proceso de pulpeo <sup>2, 3, 4</sup> . El pH mayor a 8 de la pasta en suspensión al momento de formar la hoja puede tener un gran efecto en la reversión de color <sup>10</sup> .
<b>Cenizas *</b>	19.37 ±0.12 ab	19.02 ±0.37 b	20.78 ±0.26 a	14.37 ±0.29 c	Pueden inhibir la fabricación de pasta, afectan el envejecimiento y producen color amarillento en la pulpa celulósica <sup>9, 10</sup> . Aumentan la velocidad de oxidación de la celulosa durante el blanqueo por los agentes de blanqueo <sup>9,10</sup> .
<b>Ciclohexano *</b>	2.21 ±0.25 a	1.38 ±0.26 b	1.78 ±0.01 ab	3.14 ±0.32 c	Alto contenido de extraíbles puede limitar su uso como pulpa para papel debido a que se prefieren materias primas con bajo

<b>Acetona *</b>	1.65 ±0.15 a	0.51 ±0.15 c	1.62 ±0.22 a	2.47 ±0.08 b	<p>contenido<sup>1</sup>, los extraíbles pudieran ser una desventaja en los procesos de pulpeo ya que inhiben la fabricación de pasta y ciertos extractos producen amarillamiento<sup>2,9,10</sup> y por consiguiente ocasiona problemas en las etapas de blanqueo<sup>9,10</sup>. Además ciertos componentes de los extraíbles forman complejos con el hierro que pueden acelerar la corrosión del digestor de cocción y participar en la corrosión ciertos metales <sup>5,6,9,11</sup>.</p>
<b>Metanol *</b>	14.33 ±0.85 a	9.08 ±0.92 c	17.96 ±0.89 b	13.01 ±0.46 a	
<b>Agua *</b>	13.78 ±1.1 a	10.83 ±0.7 c	13.60 ±0.001 a	17.05 ±0.32 b	
<b>Extraíbles totales</b>	31.98 ±1.1 b	21.82 ±0.73 c	34.97 ±0.98 ab	35.69 ±0.22 a	<p>Se ha demostrado que algunos extraíbles inhiben la fabricación de pasta al sulfito. Sin embargo mediante el proceso de fabricación de pasta kraft se obtienen extractos como subproductos que se utilizan comercialmente<sup>11</sup>.</p> <p>Algunos extraíbles combinados con la lignina pueden ser resistentes a la deslignificación en los procesos de pulpeo<sup>12</sup>.</p> <p>Bajo contenido de extraíbles disminuye la absorción de luz en las fibras de papel<sup>10</sup>.</p>
<b>Lignina Runkel ♦</b>	19.95 ±0.74 b	22.64 ±0.8 ab	12.54 ±0.02 c	25.70 ±1.55 a	<p>Bajo contenido de lignina en los materiales lignocelulosicos es deseable debido a que proporciona mayor rendimiento de la pulpa y deslignificación más rápida<sup>1</sup>.</p> <p>Bajo contenido de lignina en la pulpa disminuye la absorción de la luz, aumenta la capacidad de unión de la superficie de las fibras, la flexibilidad, fortalece la fibra y el hichamiento<sup>10</sup>.</p>
					<p>Alto contenido de celulosa y hemicelulosas favorece los rendimientos en los procesos de pulpeo<sup>1</sup>. Sin embargo alto contenido de hemicelulosas puede tener efectos negativos debido a que pueden ser hidrolizados por ataque alcalino<sup>1, 6, 9, 10, 11</sup>.</p> <p>La reversión de color de la pulpa blanqueada esta relacionada con el alto contenido de hemicelulosas <sup>6,10</sup>.</p>

<b>Holocelulosa</b> ♦	34.21 ±0.19 a	32.94 ±1.17 a	37.17 ±0.76 b	26.78 ±0.07 c	Las hemicelulosas tienen influencia notable en las propiedades de las fibras para fabricar papel, un alto contenido de hemicelulosas aumenta la capacidad de unión de la superficie de las fibras y la facilidad con la que las fibras se hinchan <sup>6,10</sup> . Las hemicelulosas contribuyen en mucho a las propiedades de resistencia a la tensión, explosión y doblez de la hoja de la pulpa <sup>6</sup> .
<b>Alfa-celulosa</b> ♣	19.45 ±0.19 c	27.94 ±0.35 d	23.86 ± 1.42 b	21.94 ±1.2 ab	Valores altos de alfa-celulosa son favorables en los procesos de cocción para la obtención de pulpa y papel <sup>6</sup> . Bajo grado de polimerización fortalece las fibras de papel <sup>10</sup> . El alfa-celulosa es relativamente resistente a la extensa disolución de los químicos del pulpeo y los agentes oxidantes utilizados en el blanqueo <sup>6,9</sup> . Favorece la blancura de la pulpa blanqueada, incluso con la edad <sup>10</sup> .

Letras iguales en renglón presenta igualdad estadística ( $\alpha=0.05$ ). \* Porcentaje en base a harina de *Eichhornia crassipes* libre de humedad, ♦Porcentaje en base a harina de *E. crassipes* libre de humedad y libre de extraíbles, ♣Porcentaje en base a la holocelulosa libre de humedad. <sup>1</sup>MacLeod (2007), <sup>2</sup>Fengel y Wegener (1989), <sup>3</sup>Poblete *et al.* (1991), <sup>4</sup>Ávila y Rutiaga (2015), <sup>5</sup>MacLean y Gardner (1953), <sup>6</sup>Libby (1984), <sup>7</sup>Sosa *et al.* (2015), <sup>8</sup>Giacomozzi (2010) <sup>9</sup>Macdonald y Franklin (1969) <sup>10</sup>Rapson (1963), <sup>11</sup>Grace *et al.* (1996), <sup>12</sup>David y Shiraishi (1991).

### 7.1.3. pH

Los valores de pH fueron cercanos al valor neutro. El pH a través de la planta no presentó diferencias significativas, solamente la raíz presento diferencias. A esta planta se le han atribuido diversos usos sin embargo se sabe que el pH también puede contribuir a varios problemas en los siguientes procesos: compostas, fijación de sustancias conservantes, fabricación de aglomerados, productos plástificados; y en el proceso de pulpeo (Fengel y Wegener, 1989; Poblete *et al.*, 1991; Balasubramanian *et al.*, 2013). En la tabla 8 se describen otros efectos en el proceso de pulpeo, de acuerdo a los valores obtenidos se estima que el pH no tendría efectos negativos.

#### 7.1.4. Cenizas

El contenido de cenizas se presenta en la tabla 8. El contenido de cenizas en la planta, raíz y tallo son estadísticamente similares presentando diferencias significativas en las hojas. Los porcentajes de cenizas a través de la planta se encuentran crecientes de la siguiente forma tallo>raíz>hojas coincidiendo con el hecho de que la mayor absorción de minerales en *E. crassipes* se lleva a cabo a través del tallo (rizoma) (Mahmood *et al.*, 2005). Los valores encontrados en esta investigación son mayores a los reportados en raíz (14.6%), tallo (rizoma 13.6 y peciolo 6.6%), hoja 5.9% por Dantas *et al.* (2012), y menores en tallo (22.29%) y similares en hojas (15.41%) a los reportados por Joedodibroto *et al.* (1983). En cuanto a la planta los valores son comparables y están dentro del rango 19.1 a 22.9% reportados por Shoyakubov y Aitmetova (1999), Bhattacharya y Kumar (2010), y por Fileto *et al.* (2013). Los valores de cenizas en *Eichhornia crassipes* son mayores a otras plantas acuáticas (4.9%) *Typha dominguensis*, (7.05%) *Cyperus papyrus* (Escoto *et al.*, 2013), (7.39%) *Panicum repens* y (11.45%) *Schoeneoplectus californicus* (Joedodibroto *et al.*, 1983), y menores a (26.2%) en *Pistia stratiotes* (Shoyakubov y Aitmetova, 1999). Los porcentajes de cenizas en *Eichhornia crassipes* son superiores a 0.5% (Macdonald y Franklin, 1969), y al rango 0.1–0.8% (Fengel y Wegener, 1989) reportados en maderas que se utilizan en la obtención de pulpa celulósica. El alto contenido de minerales en *E. crassipes* está relacionado a su propiedad natural de absorción, ya que esta planta acuática utiliza estructuras interiores para absorber minerales, nutrientes y agua del suelo y llevar a cabo estas sustancias a través de la planta donde se reducen considerablemente, y funcionan principalmente como discos de fijación de minerales (Mahmood *et al.*, 2005). En la tabla 8 se presentan los efectos de las cenizas el proceso de pulpa para papel.

#### 7.1.5. Extraíbles

Los porcentajes de extraíbles presentaron diferencias significativas en cada una de las secciones de la planta (Tabla 8). Los rendimientos de extraíbles fueron decrecientes de las hojas>tallo>raíz. En relación a los solventes utilizados también se presentaron diferencias significativas, la mayor solubilidad se presentó con los disolventes más polares (metanol y agua). Los valores de los extraíbles en agua caliente de tallo y hoja son menores a (24.71%) en tallo y (28.56%) en hojas reportados por Joedodibroto *et al.* (1983). En cuanto a la planta de *E. crassipes* son menores a los reportados en otras plantas acuáticas (15.83%) *Panicum repens*, y (14.43%) *Schoenoplectus californicus* (Joedodibroto *et al.*, 1983), y a los obtenidos con disolventes orgánicos etanol-tolueno (9.56%) *Cyperus papyrus*, (12.41%) *Typha dominguensis* (Escoto *et al.*, 2013). En cuanto al aprovechamiento tecnológico de *Eichhornia crassipes* su alto contenido de extraíbles pueden tener efectos en la calidad de celulosa y papel como se describe en la tabla 8. En la literatura se ha escrito que los extraíbles causan diversos problemas en la fabricación de

pasta. También se ha indicado que los extraíbles causan ciertas molestias que no se evitan con el envejecimiento de la pulpa. Los porcentajes de extraíbles que se han reportado en especies de pino que son las más utilizadas en la industria de celulosa y papel oscilan entre 2.4 a 7.7% (Fengel y Wegener, 1989; Macdonald y Franklin, 1969) por lo tanto la cantidad extraíbles presentes en *Eichhornia crassipes* son superiores a los de las especies de *Pinus*. Sin embargo los extraíbles son de gran importancia debido a que son fuente de muchos desechos donde se obtienen subproductos que se utilizan comercialmente, además prestan resistencia a los insectos, dan a los materiales lignocelulocicos su olor, sabor, y color (Macdonald y Franklin, 1969; Grace *et al.*, 1996).

#### 7.1.6. Lignina Runkel

Los valores de lignina Runkel presentaron diferencias significativas en relación a cada parte de la planta (Tabla 8). La mayor cantidad de lignina se presentó en las hojas después en la raíz, el tallo presentó el valor menor. En otras investigaciones sobre esta planta acuática también se ha reportado menor cantidad de lignina en el tallo (8.67%), y mayor en hojas (23.54%), (Joedodibroto *et al.*, 1983). De acuerdo a diferentes fuentes se han reportado valores de lignina en hojas que varían entre 4.37 a 26.36% (Poddar *et al.*, 1991; Chanakya *et al.*, 1993; Patel *et al.*, 1993; Sornvoraweat y Kongkiattikajorn, 2010); los valores de lignina en las hojas encontrados en esta investigación están dentro de rango mencionado. En investigaciones realizadas sobre el tallo con hoja se han reportado valores de lignina que varían de 3.93 a 10% (Gunnarsson y Petersen, 2007; Kumar *et al.*, 2009; Bhattacharya y Kumar, 2010; Sornvoraweat y Kongkiattikajorn, 2010; Reales *et al.*, 2013). En relación a la planta se han reportado valores menores de lignina obtenida mediante otro método que varió de 3.8 a 5.3% dependiendo del sitio de colecta (Fileto *et al.*, 2013), y mayores en otras plantas acuáticas (21.48%) *Panicum repens*, (26.12%) *Schoenoplectus californicus* (Joedodibroto *et al.*, 1983), (25.65%) *Typha dominguensis* (Escoto *et al.*, 2013). El contenido de lignina en *Eichhornia crassipes* es bajo a comparación al contenido en la madera de *Pinus* que oscila alrededor de 25% (Macdonald y Franklin, 1969), 10.2- 29.8% (Fengel y Wegener, 1989), por otro lado el bajo contenido de lignina en los materiales lignocelulosicos es deseable debido a que proporciona mayor rendimiento de la pulpa y deslignificación rápida (MacLeod, 2007). En la tabla 8 describen otros efectos.

#### 7.1.7. Holocelulosa

La holocelulosa representa la fracción total de polisacáridos, estos componentes están conformados en conjunto de celulosa y hemicelulosas (principalmente son xilosa y manosa), (Macdonald y Franklin, 1969). Los porcentajes de holocelulosa a través de las partes de *Eichhornia crassipes* presentaron diferencias significativas (Tabla 8). El mayor porcentaje de holocelulosa se registró en el tallo (37.17%) seguido de la raíz (32.94%) y

finalmente las hojas (26.78%). Se han publicado valores de carbohidratos menores en raíz (13.6%), tallo (13.7%) y hojas (11.9%) por Dantas *et al.* (2012). En relación a la planta de *E. crassipes* 50.1% de hemicelulosa, y 18.3% de celulosa (Fileto *et al.*, 2013). De acuerdo a diferentes fuentes se han publicado valores de celulosa en hojas y tallos con hojas que varían entre 17.8% a 31.67%, y en cuanto a hemicelulosas valores que varían de 18.42% a 43.4% (Poddar *et al.*, 1991; Chanakya *et al.*, 1993; Patel *et al.*, 1993; Gunnarsson y Petersen, 2007; Kumar *et al.*, 2009; Bhattacharya y Kumar, 2010; Sornvoraweat y Kongkiattikajorn, 2010; Reales *et al.*, 2013). En otras plantas acuáticas se han documentado valores mayores de holocelulosa 84.2% *Cyperus papyrus*, 78.29% *Typha dominguensis* (Escoto *et al.*, 2013). En relación a las cantidades de celulosa se ha registrado en *Panicum repens* (53.88%), *Schoenoplectus californicus* (61.78%), y *Pistia stratiotes* (21.8%), (Joedodibroto *et al.*, 1983; Shoyakubov y Aitmetova, 1999). Por otro lado los porcentajes de holocelulosa en la madera son de 70%, en específico 50% de celulosa, y 20% de hemicelulosas (Macdonald y Franklin, 1969), y 70-74% para el género *Pinus* (Fengel y Wegener, 1989). En la tabla 8 se detallan algunos efectos de la celulosa y hemicelulosas en la industria de celulosa y papel. Sin embargo cuanto mayor sea la proporción de polisacáridos (celulosa y hemicelulosas) en los materiales lignocelulosicos favorecen el rendimiento en pulpas para papel (MacLeod, 2007), por lo tanto el porcentaje obtenido de holocelulosa en *E. crassipes* (34.21%) favorece poco el rendimiento de pulpa celulósica.

#### 7.1.8. Alfacelulosa

El alfacelulosa representa la fracción de celulosa no degradada, de alto peso molecular. Los porcentajes de  $\alpha$ -celulosa a través de las secciones de *Eichhornia crassipes* presentaron diferencias significativas (Tabla 8). Los valores de  $\alpha$ -celulosa fueron decrecientes raíz>tallo>hoja. En otras plantas acuáticas se han registrado valores menores de  $\alpha$ -celulosa 17.91% *Cyperus papyrus*, 15.23% en *Typha dominguensis* (Escoto *et al.*, 2013). En la tabla 8 se describen los efectos de  $\alpha$ -celulosa en la industria de celulosa y papel.

#### 7.1.9. Microanálisis de cenizas

Los elementos detectados y valores en porcentaje de las cenizas de *Eichhornia crassipes* se presentan en la tabla 9. El elemento más abundante en planta, raíz y hojas de *Eichhornia crassipes* fue el potasio, siguiéndole el cloro, en particular en el tallo se presentó mayor concentración de cloro siguiéndole el potasio, por otro lado se sabe que el calcio, el potasio y el magnesio son los principales elementos presentes en la madera (Fengel y Wegener, 1989). Los silicatos (aluminio, hierro, magnesio y calcio) pueden causar problemas en las superficies de los equipos de transferencia de calor donde se lleva a cabo

la combustión del licor negro (Grace *et al.*, 1996). Se ha escrito en la literatura que cantidades de hierro, cobre y manganeso (aproximadamente 1 microgramo por gramo de pulpa) afectan el envejecimiento y producen color amarillento en la pulpa celulósica (Rapson, 1963). Sin embargo, esta planta acuática ha demostrado una sorprendente capacidad para absorber y concentrar muchos metales tóxicos de los medios acuáticos, donde se ha detectado Pb, Cu, Cd, Zn, Hg, Cr, Ni, Zn, Na, Ca, Mg, K y Fe (Henry y Camargo, 2006; Benítez *et al.*, 2011; Mahamadi, 2011; Modenés *et al.*, 2013; Espinoza *et al.*, 2013). En la tabla 9 se describen los efectos de los elementos inorgánicos de las cenizas que pudieran tener efectos en la industria de pulpa y papel.

**Tabla 9.** Elementos inorgánicos encontrados en *Eichhornia crassipes* y su efecto de en la industria de pulpa y papel.

Elemento	Planta	Raíz	Tallo	Hoja	Efecto en la industria de pulpa y papel
<b>Potasio</b>	29.22 ±1.24 a	23.94 ±0.97 c	28.47 ±0.79 a	37.29 ±0.41 b	Favorece la formación de incrustaciones <sup>7</sup> . Afecta la calidad de licor blanco <sup>4</sup> . Altas concentraciones pueden causar problemas en la caldera de recuperacion <sup>10</sup> .
<b>Cloro</b>	21.42 ±1.16 a	9.85 ±0.18 c	35.27 ±0.52 b	24.94 ±0.93 a	Altas concentraciones pueden causar corrosión en lo equipos y la obstrucción al paso de gas en la caldera de recuperación <sup>4, 6, 10, 12, 13,14</sup> .
<b>Calcio</b>	13.01 ±0.56 a	10.85 ±0.56 c	11.72 ±0.67 a	13.52 ±1.72 b	Favorece la formación de incrustaciones sobre las superficies de intercambio de calor donde se lleva a cabo la combustión del licor negro y en el digestor, aumenta la corrosión en las tuberías de los evaporadores <sup>2, 3, 4, 7, 15, 16</sup> . Afecta la calidad del licor blanco <sup>6</sup> .
<b>Sodio</b>	9.38 ±0.74 a	9.16 ±0.32 a	11.34 ±0.59 b	2.2 ±0.39 c	Favorece la formación de incrustaciones <sup>6,7</sup> .
<b>Magnesio</b>	7.86 ±0.62 a	8.69 ±0.66 b	7.68 ±0.67 a	9.22 ±0.79 b	Puede producir cal inerte en el ciclo de cal <sup>4, 15,16</sup> .
<b>Silicio</b>	7.48 ±1.19 b	18.48 ±0.92 c	0.37 ±0.11 a	0.91 ±0.15 a	Mayor temperatura de fusión al fundido <sup>6</sup> . Mala calidad en las etapas de blanqueo <sup>6</sup> . Inerte en el ciclo de cal <sup>4</sup> . Pueden generar incrustaciones en superficies de transferencia de calor en la

					planta del digestor, chimeneas y en evaporadores <sup>2, 6, 15, 16</sup> .
<b>Aluminio</b>	1.65 ±0.32 b	5.01 ±0.84 a	nd	nd	Puede causar problemas en las superficies de los equipos de transferencia de calor donde se lleva a cabo la combustión del licor negro <sup>3</sup> . Favorece la formación de incrustaciones, aumentando la corrosión en superficies de transferencia de calor en la planta del digestor y en tuberías de los evaporadores <sup>6, 15, 16</sup> . Puede producir cal inerte en el ciclo de cal <sup>15, 16</sup> .
<b>Fosforo</b>	4.22 ±0.45 b	3.33 ±0.63 a	3.63 ±0.57 a	7.88 ±0.89 c	Puede producir cal inerte en el ciclo de cal, <sup>6, 15, 16, 17</sup> .
<b>Azufre</b>	3.7 ±0.52 b	6.04 ±0.54 a	1.47 ±0.23 d	2.1 ±0.42 c	Puede causar problemas en el sistema de recuperación de productos químicos <sup>10</sup> .
<b>Manganeso</b>	nd	0.88 ±0.11	nd	nd	Afecta el envejecimiento y producen color amarillento en la pulpa celulósica <sup>1</sup> . Tiene efectos de inhibición en la reversión de brillo en la celulosa <sup>1</sup> . Causa efectos negativos en las etapas de blanqueo y en la hidrólisis de las cadenas de celulosa <sup>5, 7, 8, 9, 11</sup>
<b>Hierro</b>	2.01 ±0.33 a	3.54 ±0.51 b	nd	nd	Alto contenido puede causar corrosión en el digestor de pulpeo y en los equipos de evaporación, transferencia de calor, y donde se lleva a cabo la combustión del licor negro <sup>3, 5, 6</sup> . Afecta el envejecimiento y produce color amarillento en la pulpa celulósica <sup>1, 2</sup> . Causa reversión de brillo en la celulosa <sup>1</sup> Reacciona con los componentes no celulósicos de pulpa al sulfito sin blanquear <sup>1</sup> . Causa efectos negativos en las etapas de blanqueo y en la hidrólisis de las cadenas de celulosa <sup>5, 8, 7, 9, 11</sup> .

<b>Titanio</b>	nd	0.18 ±0.04	nd	nd	_____
----------------	----	---------------	----	----	-------

Letras iguales en renglón presenta igualdad estadística ( $\alpha=0.05$ ), nd = no detectada, <sup>1</sup>Rapson (1963), <sup>2</sup>Libby (1984), <sup>3</sup>Grace *et al.* (1996), <sup>4</sup>Sithole y Allen (2002), <sup>5</sup>Torres *et al.* (2005), <sup>6</sup>Paper mart (2009), <sup>7</sup>Giacomozzi (2010). <sup>8</sup>Lachenal *et al.* (1980), <sup>9</sup>Soinnii *et al.* (1998) <sup>10</sup>Doldán *et al.* (2011), <sup>11</sup>Sjöström y Välttilä (1978), <sup>12</sup>Ferreira *et al.* (2003), <sup>13</sup>Backman *et al.* (1995), <sup>14</sup>Ulmgren (1987), <sup>15</sup>Rabelo *et al.* (2001), <sup>16</sup>Vakkilainen (2005), <sup>17</sup>Tran y Vakkilainen (2007).

## 7.2. Pulpeo kraft

### 7.2.1. Rendimiento

Los resultados del análisis de varianza (ANOVA) indican que no hubo diferencia estadística significativa sobre la variable de respuesta rendimiento (Tabla 10 y 11) para ambas cargas de reactivos.

**Tabla 10.** Análisis de varianza (ANOVA) para el rendimiento a 10% de carga de reactivos

Analysis of Variance for Rend

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
A:Temp	24.186	1	24.186	1.22	0.3190
B:Tiempo	1.13251	1	1.13251	0.06	0.8203
AB	47.2878	1	47.2878	2.39	0.1826
blocks	15.1044	1	15.1044	0.76	0.4220
Total error	98.8413	5	19.7683		
Total (corr.)	186.552	9			

R-squared = 47.0168 percent  
R-squared (adjusted for d.f.) = 20.5252 percent

**Tabla 11.** Análisis de varianza (ANOVA) para el rendimiento a 20% de carga de reactivos

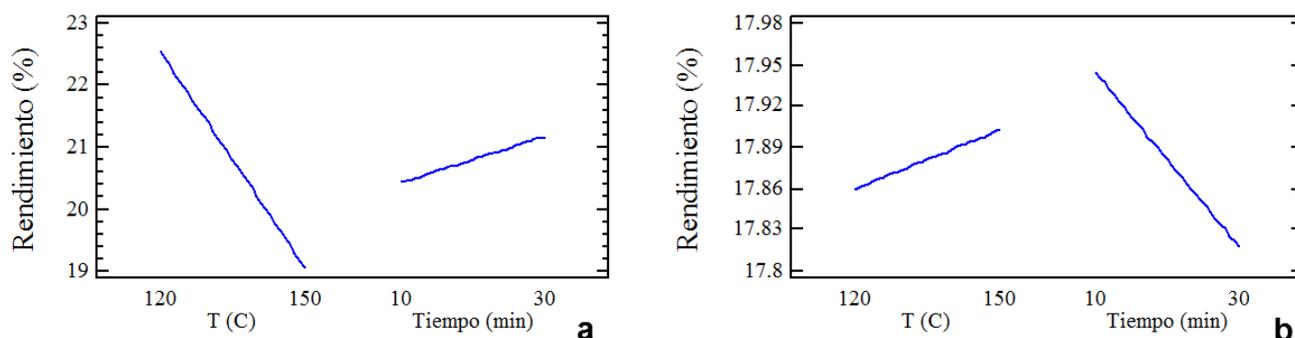
Analysis of Variance for Rendimiento

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
A:T	0.0036125	1	0.0036125	0.00	0.9674
B:Tiempo	0.0325125	1	0.0325125	0.02	0.9025
AB	0.418613	1	0.418613	0.21	0.6634
blocks	0.12769	1	0.12769	0.07	0.8087
Total error	9.80066	5	1.96013		
Total (corr.)	10.3831	9			

R-squared = 5.60939 percent  
R-squared (adjusted for d.f.) = 0.0 percent

En las figuras 9 y 10 se presentan los efectos temperatura y tiempo a 10 y 20% de carga de reactivos, donde se observa mayores porcentajes de rendimiento a 10% carga de reactivos a comparación de 20%, esto se apoya en la tabla 12 y 13. Widyanto *et al.* (1983) también reportan una disminución del rendimiento al incrementar la carga de reactivos de cocción de *E. crassipes*. En particular el rendimiento óptimo fue de 25.34% y se obtuvo a una temperatura de 150 °C y 30 minutos como se aprecia en la tabla 12 y figura 10a, los rendimientos obtenidos en esta investigación están dentro de rango 15 a 30% publicados por Bagnall *et al.* (1974). En cuanto la cocción al incrementar el factor temperatura a 10% de carga de reactivos, el rendimiento disminuye para 20% de carga al incrementar el tiempo de cocción disminuye el rendimiento, por lo anterior en la literatura se ha escrito que mientras se incrementa el tiempo de cocción se asegura mayor deslignificación pero se tiene un límite, ya que llega un momento en el que se afecta el material celulósico y se degrada (Casey 1990).

En pulpeo kraft de madera de coníferas y latifoliadas es conocido que los valores de rendimiento varían entre 44 a 51% (Libby, 1984; Rutiaga *et al.*, 1998; Juacida *et al.*, 2002), por lo tanto los rendimientos de la pulpa kraft de *Eichhornia crassipes* no están en el intervalo comercialmente aceptable, sin embargo para obtener estos rendimientos en madera, se requirió 20% carga de reactivos y mayores temperaturas de 168 a 170 °C, lo cual marca la pauta para asegurar que para obtener el máximo rendimiento en *Eichhornia crassipes* se requieren bajos costos de cocción. La variabilidad de los componentes químicos orgánicos presentes en las diferentes especies indica diferentes demandas de reactivo y tiempos de pulpeo (Juacida *et al.*, 2002). En pulpeos realizados anteriormente de *E. crassipes* se han reportado rendimientos mediante pulpeo kraft 51.3% y por NaOH 88.6% (Nolan y Kirmse, 1974), aplicando pulpeo con NaOH Joedodibroto *et al.*, (1983) publica un rendimiento de 42.1%, aplicando el mismo pulpeo alcalino (Widyanto *et al.*, 1983) obtienen 52.83%. Recientemente Atanu *et al.* (2013) reportan un rendimiento de 40% aplicando el proceso kraft. En otras plantas acuáticas pulpeadas con NaOH se han reportado rendimientos mayores de 77.27% *Cyperus papyrus*, y 61.01% *Typha dominguensis* (Escoto *et al.*, 2013).



**Figura 9.** Grafica de efectos principales de rendimiento **a)** 10% carga de reactivos, **b)** 20% carga de reactivos.

**Tabla 12.** Condiciones óptimas de rendimiento a 10% carga de reactivos

Optimize Response  
-----  
Goal: maximize Rend

Optimum value = 25.3492

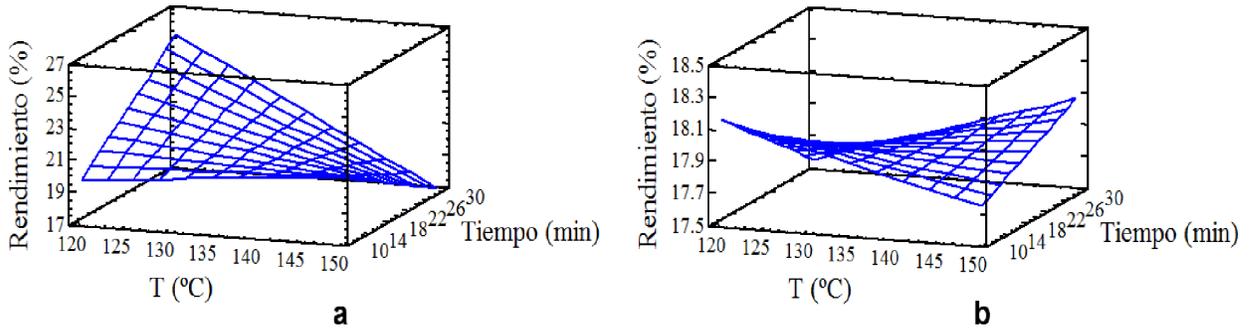
Factor	Low	High	Optimum
Temp	120.0	150.0	120.0
Tiempo	10.0	30.0	30.0

**Tabla 13.** Condiciones óptimas de rendimiento a 20% carga de reactivos

Optimize Response  
-----  
Goal: maximize Rendimiento

Optimum value = 18.1523

Factor	Low	High	Optimum
T	120.0	150.0	120.0
Tiempo	10.0	30.0	10.0



**Figura 10.** Superficies de respuesta para el rendimiento en función de la temperatura y tiempo **a)** 10% carga de reactivos, **b)** 20% carga de reactivos.

### 7.2.2. Rechazos

En la variable de respuesta rechazos, el análisis de varianza (ANOVA) sólo muestra que el factor temperatura es estadísticamente significativo sobre la variable de respuesta (Tabla 14 y 15).

**Tabla 14.** Análisis de varianza (ANOVA) para rechazos a 10% de carga de reactivos

Analysis of Variance for Rechazos

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
A:Temp	23.9778	1	23.9778	33.96	0.0021
B:Tiempo	1.47061	1	1.47061	2.08	0.2086
AB	2.05031	1	2.05031	2.90	0.1491
blocks	0.21025	1	0.21025	0.30	0.6087
Total error	3.5303	5	0.706061		
Total (corr.)	31.2393	9			

R-squared = 88.6992 percent  
R-squared (adjusted for d.f.) = 83.0487 percent

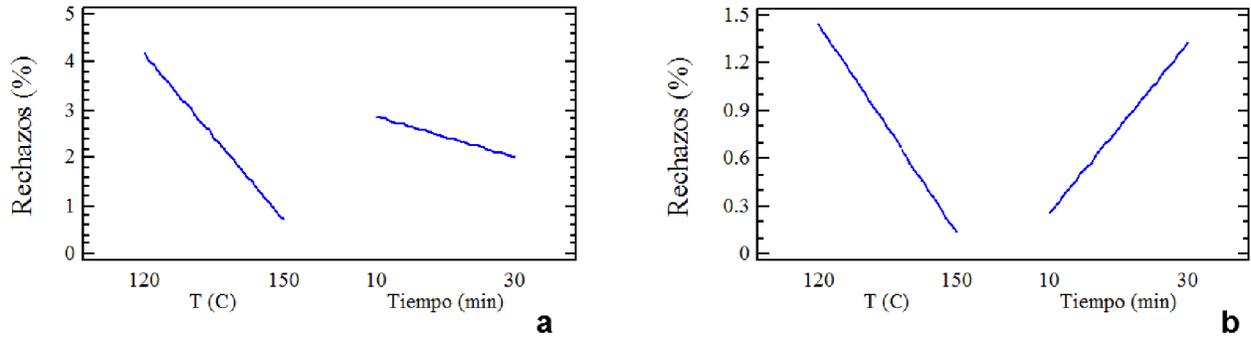
**Tabla 15.** Análisis de varianza (ANOVA) para rechazos a 20% de carga de reactivos

Analysis of Variance for Rechazos

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
A:T	3.39301	1	3.39301	15.47	0.0110
B:Tiempo	2.30051	1	2.30051	10.49	0.0230
AB	1.52251	1	1.52251	6.94	0.0463
blocks	0.24964	1	0.24964	1.14	0.3349
Total error	1.09692	5	0.219384		
Total (corr.)	8.5626	9			

R-squared = 87.1894 percent  
R-squared (adjusted for d.f.) = 80.7841 percent

En las figuras 11 y 12 se muestra gráficamente que los porcentajes de rechazos son menores a 20% de carga a comparación de 10%, y también disminuyen al incrementar la temperatura de cocción, lo que coincide con MacLeod (2007) al disminuir las variables carga de reactivos, temperatura, sulfonación y tamaños de astillas inadecuados, favorecen el incremento de rechazos en el pulpeo. Los valores óptimos, para ambas cargas de reactivos se obtuvieron a 150 °C y 10 minutos como se indica en las tablas 16 y 17. Los porcentajes de rechazos son similares a los reportados en especies maderables de coníferas y latifoliadas que van de 1.5 a 3.4% (Juacida *et al.*, 2002) y dentro del rango 1.7-8.9% en pulpeo kraft del arbusto *Chusquea culeou* (Mariani y Torres 2004).



**Figura 11.** Gráfica de efectos principales de rechazos a) 10% carga de reactivos, b) 20% carga de reactivos

**Tabla 16.** Condiciones óptimas de rechazos a 10% carga de reactivos

Optimize Response

Goal: minimize Rechazos

Optimum value = 0.63025

Factor	Low	High	Optimum
Temp	120.0	150.0	150.0
Tiempo	10.0	30.0	10.0

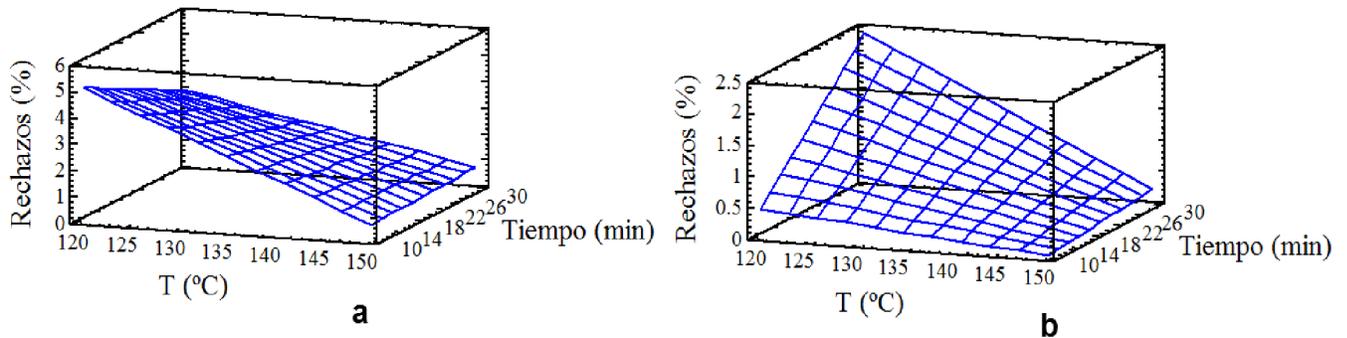
**Tabla 17.** Condiciones óptimas de rechazos a 20% carga de reactivos

Optimize Response

Goal: minimize Rechazos

Optimum value = 0.03875

Factor	Low	High	Optimum
T	120.0	150.0	150.0
Tiempo	10.0	30.0	10.0



**Figura 12.** Superficies de respuesta para los rechazos en función de la temperatura y tiempo a) 10% carga de reactivos, b) 20% carga de reactivos.

### 7.2.3. No. de kappa

El análisis de varianza (ANOVA) correspondiente al No. de kappa se muestra en las tablas 18 y 19. Se observa que el factor temperatura a 10% carga de reactivos no presenta diferencia estadística significativa, mientras que el factor tiempo a 10% y en los factores tiempo y temperatura a 20% son estadísticamente significativos sobre la variable de respuesta No. de kappa.

**Tabla 18.** Análisis de varianza (ANOVA) para No. de kappa a 10% de carga de reactivos

Analysis of Variance for Kappa					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
A:Temp	3.40605	1	3.40605	4.94	0.0770
B:Tiempo	5.34645	1	5.34645	7.75	0.0387
AB	0.03645	1	0.03645	0.05	0.8273
blocks	0.01296	1	0.01296	0.02	0.8963
Total error	3.45025	5	0.69005		
Total (corr.)	12.2522	9			

R-squared = 71.8397 percent  
R-squared (adjusted for d.f.) = 57.7595 percent

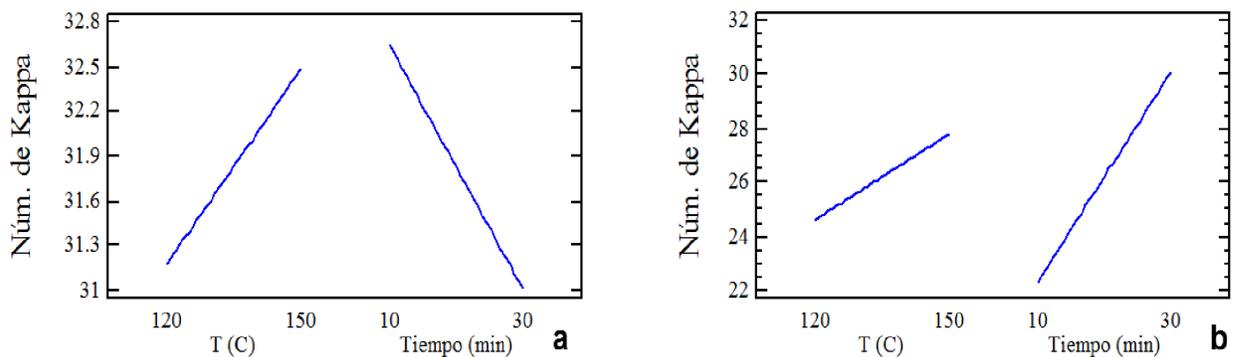
**Tabla 19.** Análisis de varianza (ANOVA) para No. de kappa a 20% de carga de reactivos

Analysis of Variance for Kappa					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
A:T	20.1612	1	20.1612	16.16	0.0101
B:Tiempo	122.305	1	122.305	98.05	0.0002
AB	1.805	1	1.805	1.45	0.2829
blocks	0.14884	1	0.14884	0.12	0.7438
Total error	6.23687	5	1.24737		
Total (corr.)	150.657	9			

R-squared = 95.8602 percent  
R-squared (adjusted for d.f.) = 93.7903 percent

En las figuras 13 y 14 se aprecia que los valores de kappa son menores a 20% carga de reactivos a comparación de 10%. En la tablas 20 y 21 se indican los valores óptimos para las dos cargas, se observa que a mayor carga de reactivos y tiempo de cocción se obtiene menor No. de kappa, otros autores reportan la misma tendencia (Casey, 1990; MacLeod, 2007; Wan *et al.*, 2009; Atanu *et al.*, 2013). En general los kappa son altos lo que manifiesta que el blanqueo de la pulpa celulósica de *Eichhornia crassipes* requerirá de altas cantidades de reactivos en el proceso de blanqueo, también se ha publicado que durante el proceso de cocción la pulpa de *E. crassipes* se oscurece (Bagnall *et al.*, 1974). Los valores

de kappa obtenidos en esta investigación son comparables a los obtenidos por el mismo proceso kraft en la misma planta acuática por Atanu *et al.* (2013) y similares a los valores obtenidos a 20% carga de reactivos a los obtenidos en pulpa a la sosa de *E. crassipes* con un kappa de 20 (Joedodibroto *et al.*, 1983), también se han registrado valores menores de kappa 12.3 obtenido mediante el mismo proceso kraft (Widyanto *et al.*, 1983). Los valores de kappa de la pulpa de *E. crassipes* están dentro del rango 18.9 a 31 reportados en pulpas kraft de especies maderables de coníferas y latifoliadas (Rutiaga *et al.*, 1998; Juacida *et al.*, 2002, Torres *et al.*, 2005). En otras plantas acuáticas se han obtenido valores mayores de kappa en pulpeos con NaOH 86.9 en *Cyperus papyrus*, y 100.7 en *Typha domingensis* (Escoto *et al.*, 2013).



**Figura 13.** Gráfica de efectos principales de No. de kappa **a)** 10% carga de reactivos, **b)** 20% carga de reactivos.

**Tabla 20.** Condiciones óptimas de No. de kappa a 10% carga de reactivos

```
Optimize Response
-----
Goal: minimize Kappa

Optimum value = 30.2905
```

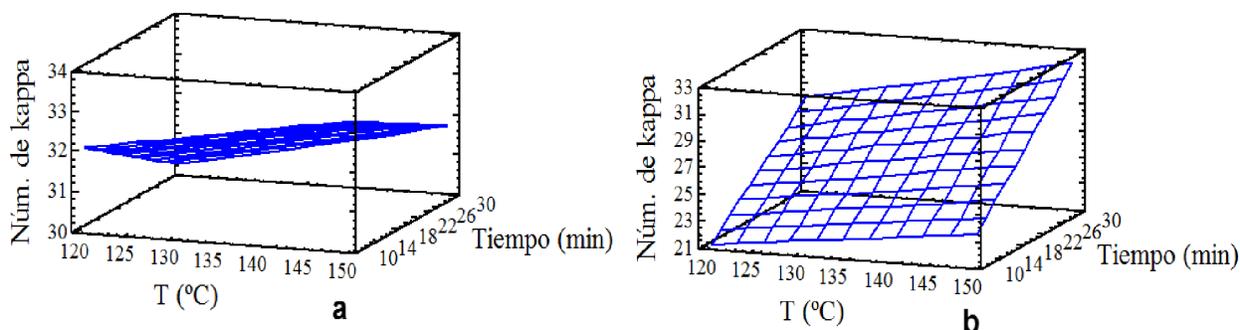
Factor	Low	High	Optimum
Temp	120.0	150.0	120.0
Tiempo	10.0	30.0	30.0

**Tabla 21.** Condiciones óptimas de No. de kappa a 20% carga de reactivos

```
Optimize Response
-----
Goal: minimize Kappa

Optimum value = 21.1895
```

Factor	Low	High	Optimum
T	120.0	150.0	120.0
Tiempo	10.0	30.0	10.0



**Figura 14.** Superficies de respuesta para No. de kappa en función de la temperatura y tiempo **a)** 10% carga de reactivos, **b)** 20% carga de reactivos.

#### 7.2.4. Cenizas

En el análisis de varianza (ANOVA) correspondiente al porcentaje de cenizas en la pulpa celulósica se presentan en las tablas 22 y 23, donde se indica en la columna P-value que no hubo diferencia estadística significativa sobre la variable de respuesta cenizas en los factores temperatura y tiempo a 10 y 20% carga de reactivos, solamente el factor tiempo a 10% de carga presentó estadística significativa sobre la variable de respuesta cenizas.

**Tabla 22.** Análisis de varianza (ANOVA) para cenizas a 10% de carga de reactivos

Analysis of Variance for Cenizas						
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value	
A:t	5.36281	1	5.36281	2.15	0.2026	
B:Tiempo	22.078	1	22.078	8.84	0.0310	
AB	10.557	1	10.557	4.23	0.0949	
blocks	7.744	1	7.744	3.10	0.1385	
Total error	12.4825	5	2.4965			
Total (corr.)	58.2244	9				

R-squared = 78.5613 percent

R-squared (adjusted for d.f.) = 67.842 percent

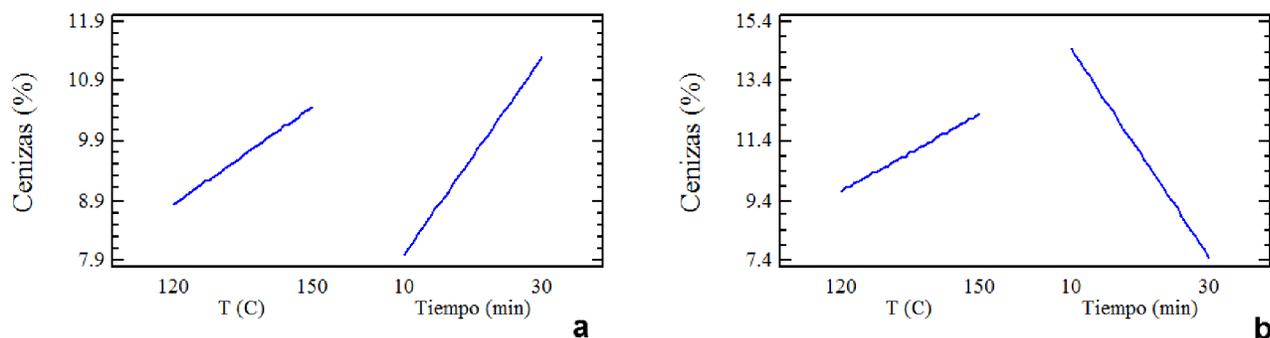
**Tabla 23.** Análisis de varianza (ANOVA) para cenizas a 20% de carga de reactivos

Analysis of Variance for Cenizas						
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value	
A:T	13.1584	1	13.1584	0.67	0.4492	
B:Tiempo	98.7013	1	98.7013	5.05	0.0745	
AB	41.5872	1	41.5872	2.13	0.2044	
blocks	0.02809	1	0.02809	0.00	0.9712	
Total error	97.6759	5	19.5352			
Total (corr.)	251.151	9				

R-squared = 61.1087 percent

R-squared (adjusted for d.f.) = 41.663 percent

En las figuras 15 y 16 se aprecia que los factores no tuvieron correlación en la reducción de la cantidad de cenizas en la pulpa celulósica. En las tablas 24 y 25 se describen los valores óptimos de cenizas donde también se respalda que no hubo correlación entre los factores tiempo y temperatura. Sin embargo en pulpeo de *Eichhornia crassipes* con NaOH se han reportado una disminución del contenido de cenizas al aumentar la concentración de NaOH, con valores que oscilan entre 8 y 11.5% (Widyanto *et al.*, 1983).



**Figura 15.** Gráfica de efectos principales de cenizas **a)** 10% carga de reactivos, **b)** 20% carga de reactivos.

**Tabla 24.** Condiciones óptimas de cenizas a 10% carga de reactivos

Optimize Response

Goal: minimize Cenizas

Optimum value = 6.01925

Factor	Low	High	Optimum
t	120.0	150.0	120.0
Tiempo	10.0	30.0	10.0

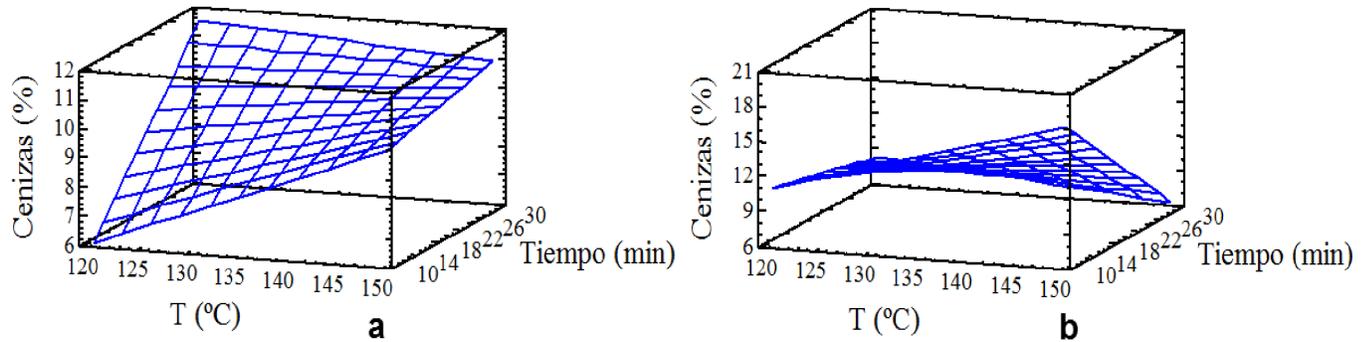
**Tabla 25.** Condiciones óptimas de cenizas a 20% carga de reactivos

Optimize Response

Goal: minimize Cenizas

Optimum value = 6.489

Factor	Low	High	Optimum
T	120.0	150.0	150.0
Tiempo	10.0	30.0	30.0



**Figura 16.** Superficies de respuesta para cenizas en función de la temperatura y tiempo **a)** 10% carga de reactivos, **b)** 20% carga de reactivos.

### 7.2.5. pH

En el análisis de varianza (ANOVA) correspondiente al pH del licor negro residual se presentan en las tablas 26 y 27, indican que los factores tiempo y temperatura a 10% carga de reactivos no hubo diferencia estadística significativa sobre la variable de respuesta pH, en específico el factor tiempo a 20% de carga hubo estadística significativa sobre la variable de respuesta pH.

**Tabla 26.** Análisis de varianza (ANOVA) para el pH del licor negro a 10% de carga de reactivos.

Analysis of Variance for pH						
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value	
A:t	0.0595125	1	0.0595125	0.18	0.6872	
B:Tiempo	0.610513	1	0.610513	1.87	0.2297	
AB	0.726012	1	0.726012	2.22	0.1961	
blocks	0.35344	1	0.35344	1.08	0.3458	
Total error	1.63232	5	0.326464			
Total (corr.)	3.3818	9				

R-squared = 51.7321 percent  
R-squared (adjusted for d.f.) = 27.5982 percent

**Tabla 27.** Análisis de varianza (ANOVA) para pH del licor negro a 20% de carga de reactivos.

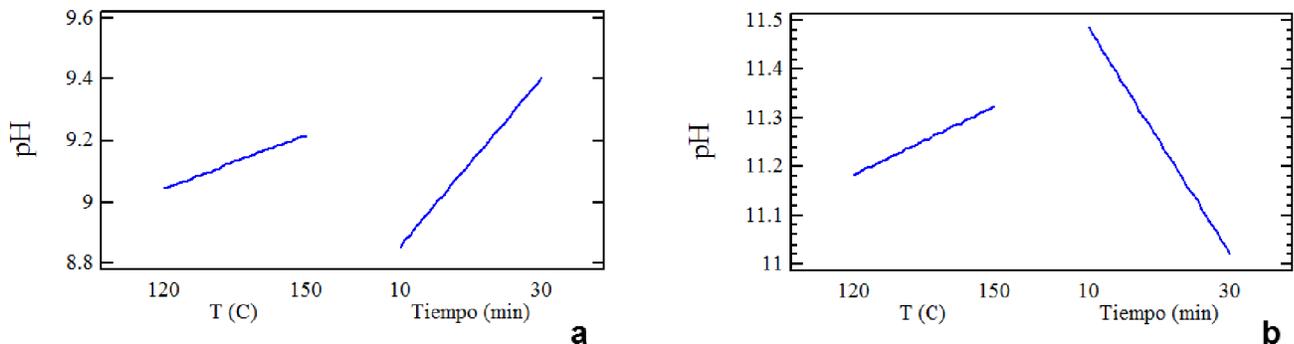
Analysis of Variance for pH

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
A:T	0.0392	1	0.0392	0.62	0.4668
B:Tiempo	0.43245	1	0.43245	6.84	0.0474
AB	0.00005	1	0.00005	0.00	0.9787
blocks	0.09409	1	0.09409	1.49	0.2770
Total error	0.31622	5	0.063244		
Total (corr.)	0.88201	9			

R-squared = 64.1478 percent

R-squared (adjusted for d.f.) = 46.2217 percent

En las figuras 17 y 18 se indican gráficamente que los valores de pH en el licor negro fueron menores a 10% de carga a comparación de 20%, también a menores temperaturas se obtienen los valores más bajos. En las tablas 28 y 29 se describen los valores óptimos de pH. A 10% de carga de reactivos se obtienen valores menores de pH lo que indican que hubo mayor consumo de los reactivos de cocción a comparación de 20% de carga, esta disminución de pH en el licor negro se da disminución de la concentración de los de iones hidróxido (Grace *et al.*, 1996), por lo tanto con 10% de carga de reactivos es suficiente para realizar la cocción kraft de *E. crassipes*.



**Figura 17.** Gráfica de efectos principales de pH **a)** 10% carga de reactivos, **b)** 20% carga de reactivos.

**Tabla 28.** Condiciones óptimas de pH en el licor negro a 10% carga de reactivos

Optimize Response

-----  
Goal: minimize pH

Optimum value = 8.46625

Factor	Low	High	Optimum
t	120.0	150.0	120.0
Tiempo	10.0	30.0	10.0

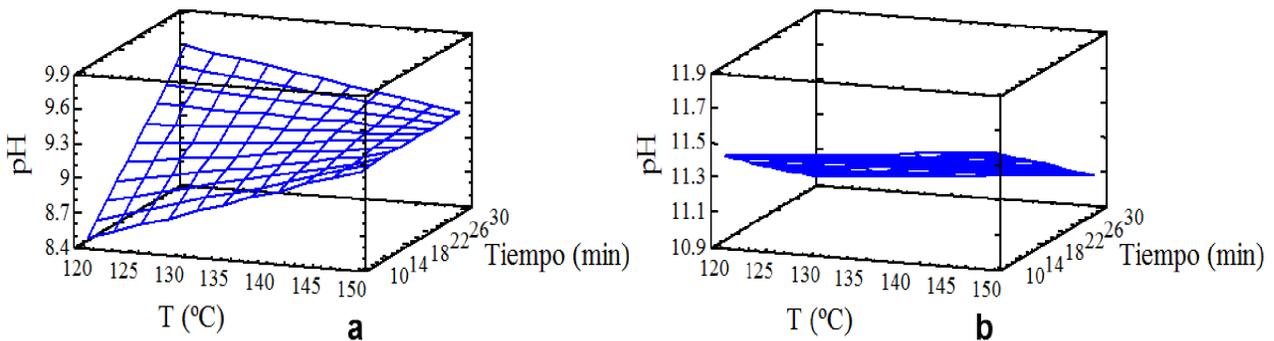
**Tabla 29.** Condiciones óptimas de pH en el licor negro a 20% carga de reactivos

Optimize Response

Goal: minimize pH

Optimum value = 10.948

Factor	Low	High	Optimum
T	120.0	150.0	120.0
Tiempo	10.0	30.0	30.0



**Figura 18.** Superficies de respuesta para pH en función de la temperatura y tiempo a) 10% carga de reactivos, b) 20% carga de reactivos.

### 7.2.6. Álcali residual

En el análisis de varianza (ANOVA) correspondiente al álcali residual del licor negro se presentan en las tablas 30 y 31, los factores tiempo y temperatura no hubo estadística significativa sobre la variable de respuesta álcali residual tanto para 10 como 20% carga de reactivos.

**Tabla 30.** Análisis de varianza (ANOVA) para álcali residual a 10% de carga de reactivos

Analysis of Variance for AR

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
A:t	0.02	1	0.02	0.14	0.7247
B:Tiempo	0.02	1	0.02	0.14	0.7247
AB	0.5	1	0.5	3.47	0.1214
blocks	0.196	1	0.196	1.36	0.2960
Total error	0.72	5	0.144		
Total (corr.)	1.456	9			

R-squared = 50.5495 percent

R-squared (adjusted for d.f.) = 25.8242 percent

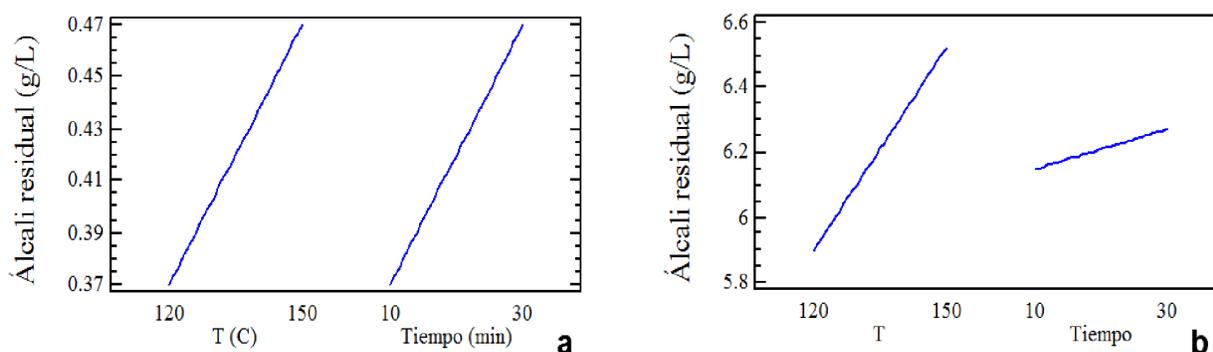
**Tabla 31.** Análisis de varianza (ANOVA) para álcali residual a 20% de carga de reactivos

Analysis of Variance for AR					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
A:T	0.78125	1	0.78125	2.16	0.2014
B:Tiempo	0.03125	1	0.03125	0.09	0.7805
AB	1.36125	1	1.36125	3.77	0.1099
blocks	0.009	1	0.009	0.02	0.8808
Total error	1.80625	5	0.36125		
Total (corr.)	3.989	9			

R-squared = 54.7192 percent

R-squared (adjusted for d.f.) = 32.0788 percent

En la figura 19 y 20, se muestra gráficamente que los menores valores de álcali residual en el licor negro se obtuvieron a 10% de carga de reactivos a comparación de 20% de carga, en cuanto a los factores tiempo y temperatura al incrementar estas variables aumentan las concentraciones del álcali residual, en pulpeo kraft del arbusto *Chusquea culeou* se han reportado consumos de álcali similares que oscilan entre 9.8 y 13.3% de álcali consumido en base a su peso seco (Mariani y Torres, 2004). Los valores óptimos se obtuvieron a menor temperatura como se describe en la tabla 32 y 33. En base a los resultados obtenidos se manifiesta que existe una correlación entre la disminución de pH con la disminución de álcali residual, esto indica que los reactivos de cocción fueron consumidos durante el pulpeo, como en el punto anterior de pH nuevamente nos demuestra que con 10% en carga de reactivos es suficiente para obtener el mayor rendimiento de pulpa celulósica de *Eichhornia crassipes*.



**Figura 19.** Gráfica de efectos principales de álcali residual a) 10% carga de reactivos, b) 20% carga de reactivos.

**Tabla 32.** Condiciones óptimas de álcali residual a 10% carga de reactivos

Optimize Response

Goal: minimize AR

Optimum value = 0.07

Factor	Low	High	Optimum
t	120.0	150.0	120.0
Tiempo	10.0	30.0	10.0

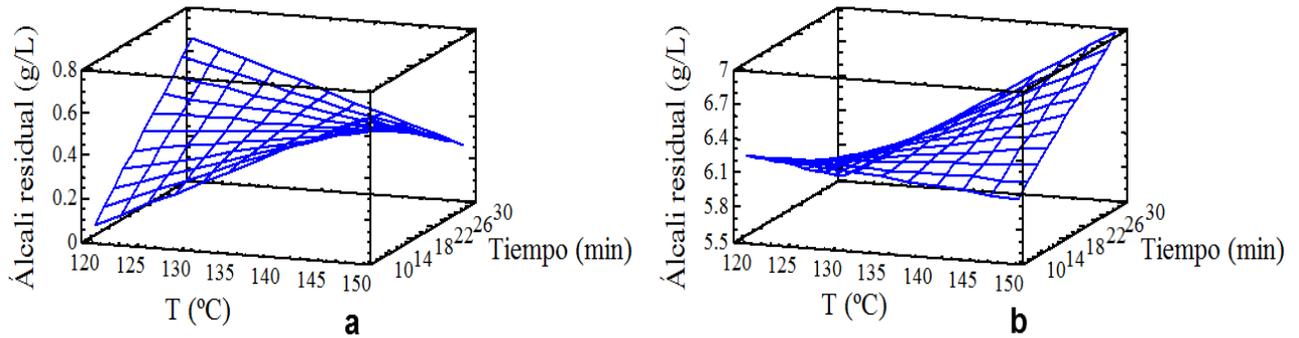
**Tabla 33.** Condiciones óptimas de álcali residual a 20% carga de reactivos

Optimize Response

Goal: minimize AR

Optimum value = 5.5475

Factor	Low	High	Optimum
T	120.0	150.0	120.0
Tiempo	10.0	30.0	30.0



**Figura 20.** Superficies de respuesta para álcali residual en función de la temperatura y tiempo **a)** 10% carga de reactivos, **b)** 20% carga de reactivos.

### 7.2.7. Sólidos totales

En el análisis de varianza ANOVA correspondiente a los sólidos totales del licor negro residual se presentan en las tablas 34 y 35, se describe para el factor tiempo a 10% de carga presenta estadística significativa sobre el factor solidos totales, para el resto de los factores no hubo estadística significativa sobre la variable de respuesta solidos totales.

**Tabla 34.** Análisis de varianza (ANOVA) para sólidos totales a 10% de carga de reactivos

Analysis of Variance for ST					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
A:t	6.86351	1	6.86351	10.80	0.0218
B:Tiempo	0.678612	1	0.678612	1.07	0.3488
AB	1.36951	1	1.36951	2.15	0.2020
blocks	0.23104	1	0.23104	0.36	0.5728
Total error	3.17756	5	0.635513		
Total (corr.)	12.3202	9			

R-squared = 74.2086 percent  
R-squared (adjusted for d.f.) = 61.3129 percent

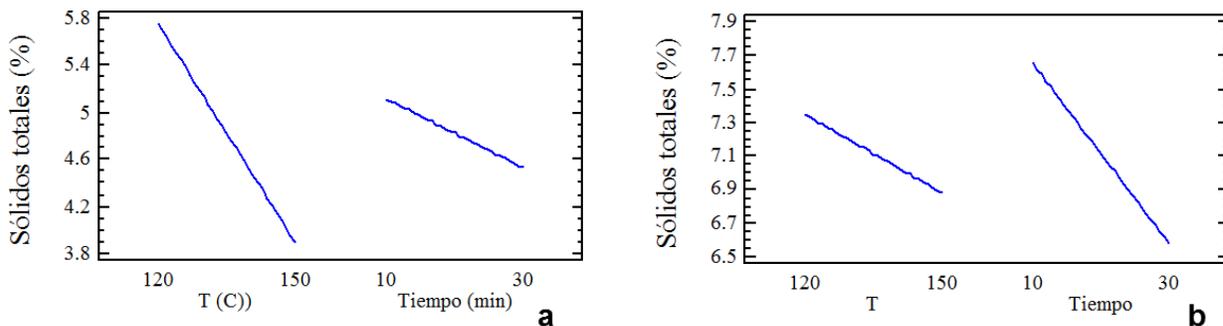
**Tabla 35.** Análisis de varianza (ANOVA) para sólidos totales a 20% de carga de reactivos.

Analysis of Variance for ST					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
A:T	0.43245	1	0.43245	0.66	0.4535
B:Tiempo	2.31125	1	2.31125	3.53	0.1192
AB	0.96605	1	0.96605	1.47	0.2789
blocks	0.80656	1	0.80656	1.23	0.3177
Total error	3.27673	5	0.655346		
Total (corr.)	7.79304	9			

R-squared = 57.9531 percent  
R-squared (adjusted for d.f.) = 36.9297 percent

En las figuras 21 y 22 se aprecia gráficamente que los porcentajes de sólidos totales fueron mayores a 20% carga de reactivos a comparación de 10% de carga, los valores óptimos para cada carga se indican en la tablas 36 y 37. En el licor negro del pulpeo kraft del arbusto *Chusquea culeou* se han registrado valores mayores que oscilan entre 14.9-17.7% de solidos totales (Mariani y Torres, 2004), en especies maderables de coníferas y latifoliadas también se han reportado valores mayores de sólidos totales que oscilan entre 17.6-21.5% (Juacida *et al.*, 2002). Los sólidos totales comprenden la presencia de componentes orgánicos como parte de los sólidos disueltos en el licor negro. Estos están presentes principalmente como ácidos orgánicos. Además, una cantidad significativa de

alcoholes disueltos tales como metanol están presentes. Algunos compuestos orgánicos pueden ser recuperados en el proceso de recuperación de productos químicos. Sin embargo, la mayoría de los compuestos orgánicos llevan hasta el horno de recuperación, donde se queman, para generar calor, a partir de carbohidratos, y dióxido de carbono (Grace *et al.*, 1996).



**Figura 21.** Gráfica de efectos principales de sólidos totales **a)** 10% carga de reactivos, **b)** 20% carga de reactivos

**Tabla 36.** Condiciones óptimas de sólidos totales a 10% carga de reactivos

```
Optimize Response
-----
Goal: minimize ST

Optimum value = 3.77525
```

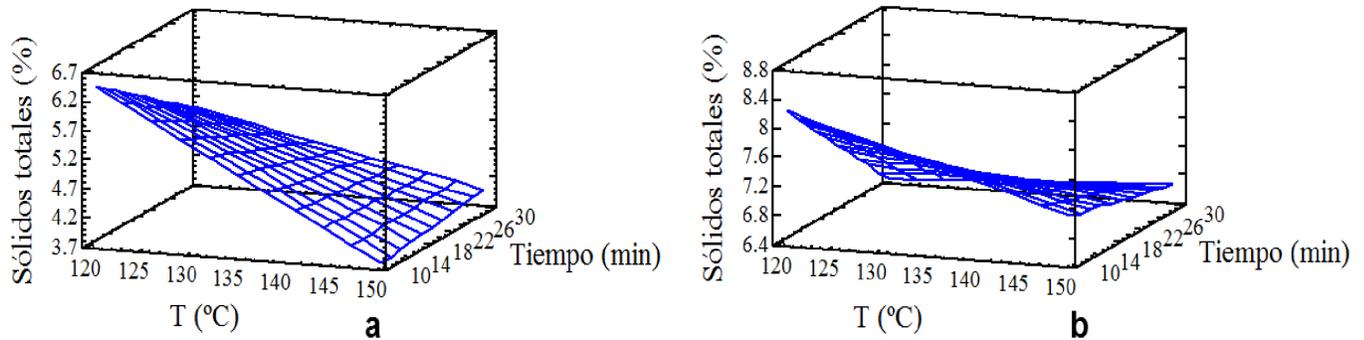
Factor	Low	High	Optimum
t	120.0	150.0	150.0
Tiempo	10.0	30.0	10.0

**Tabla 37.** Condiciones óptimas de sólidos totales a 20% carga de reactivos

```
Optimize Response
-----
Goal: minimize ST

Optimum value = 6.4635
```

Factor	Low	High	Optimum
T	120.0	150.0	120.0
Tiempo	10.0	30.0	30.0



**Figura 22.** Superficies de respuesta para sólidos totales en función de la temperatura y tiempo **a)** 10% carga de reactivos, **b)** 20% carga de reactivos.

### 7.3. Morfología de las fibras e índices de calidad de la pulpa celulósica

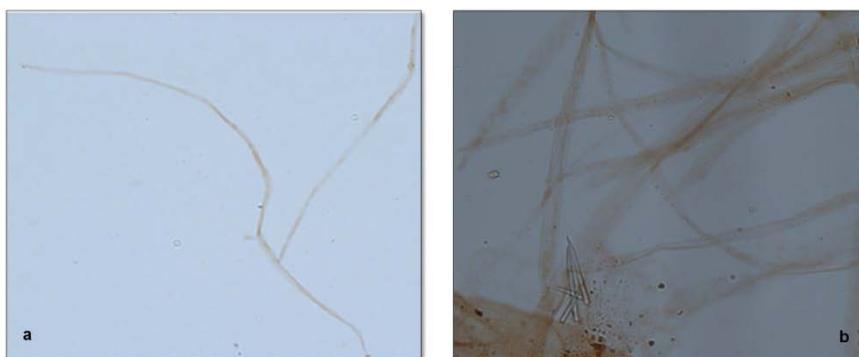
En la tabla 38 y gráficamente en la figura 23 se registra la morfología de las fibras y sus índices de calidad de la pulpa celulósica, la longitud, diámetro y espesor de la pared de las fibras, éstas características influyen en las propiedades de fabricación de papel (Rapson, 1963).

La longitud de las fibras de *E. crassipes* es corta (Figura 23) y similar a otras plantas acuáticas y menores a las longitudes en fibras de tallos y de madera (Tabla 38). En cuanto las fibras cortas Britt (1970) señala que las fibras cortas dan mejores resultados en la formación de la hoja y en la lisura de la superficie, en contraparte las propiedades de resistencia del papel esta correlacionada con la longitud larga de las fibras y son importantes en la resistencia al rasgado, tensión y doblez de la hoja, según Robinson (1991) y Young (1991), en otra investigaciones sobre la morfología de *Eichhornia crassipes* se han reportado longitudes menores de fibras 7  $\mu\text{m}$  (Mahmood *et al.*, 2005), y mayor longitud de sus fibras 2120  $\mu\text{m}$  con una relación Runkel muy buena para papel (Joedodibroto *et al.*, 1983), Se ha publicado en diversas investigaciones que el desequilibrio de nutrientes principalmente el nitrógeno, altos niveles de salinidad, metales pesados, otros materiales tóxicos en el agua y macrofitos acuáticos tiene efectos en el crecimiento de las plantas y en el tamaño de sus elementos anatómicos de *E. crassipes* (Thomas, 1983; Sooknah y Wike, 2004; Mahmood *et al.*, 2005).

El diámetro del lumen y diámetro de la fibra en *Eichhornia crassipes* es corto (Tabla 38, Figura 23), Joedodibroto *et al.*, (1983) reportan lumen ligeramente mayor 9.22  $\mu\text{m}$ , y en otras fuentes de fibras menores diámetros (Tabla 38). Los diámetros de las fibras juegan un papel importante en la rigidez, flexibilidad y área de contacto entre ellas, sin embargo se ha escrito que un diámetro amplio tanto del lumen como de la fibra, produce pulpas de muy buena calidad. Lo anterior coincide con Horn (1978), Tamolang y Wangaard (1961) y Wangaard (1962) cuando afirman que precisamente esas características de las fibras

contribuyen al desarrollo del colapso, propiciando a la vez una mayor formación de enlaces entre ellas, mejorando así la calidad de las pulpas producidas.

El grosor de la pared de *E. crassipes* es delgada y menor al grosor  $2.36\ \mu\text{m}$  reportado por Joedodibroto *et al.*, (1983) en la misma especie, y a otras fuentes de fibras diferentes (Tabla 38). Diversos autores han publicado que a menor grosor, mejor es la calidad de pulpa celulósica (Petroff y Nordman, 1968; Berwyn, 1970; Britt, 1970; Young, 1991; Tamarit, 1996), también señalan que las fibras de pared delgada tienden a colapsarse tomando forma de listones estructurales durante el pulpeo y en la formación de la hoja. Por otro lado los mismos autores en contraparte señalan que las fibras de pared gruesa se mantienen rígidas, no se colapsan, tienen muy poca superficie de contacto y por lo tanto la unión fibra a fibra es pobre, por lo que el papel fabricado con fibras de pared gruesa es de baja resistencia, voluminoso y con una gran cantidad de espacios vacíos, en tanto que empleando fibras de pared delgadas, presenta mayor adherencia, uniones compactas y fuertes, mayor resistencia a la tensión, explosión y rasgado.



**Figura 23.** Disociado de *E. crassipes*, **a)** y **b)** Se aprecia la longitud de la fibra (objetivo 4x y 10x).

El coeficiente de rigidez es delgada (bajo), coeficiente de flexibilidad es delgada (alto) y relación Runkel excelente para papel (bajo) en la pulpa celulósica de *Eichhornia crassipes* (Tabla 38), las fibras con coeficiente de rigidez y coeficientes de flexibilidad delgadas son parcialmente colapsadas, con una sección transversal elíptica. Con buena superficie de contacto, buena unión fibra-fibra (Petroff y Nordmand, 1968; Porres y Valladares, 1979), por lo tanto la pulpa de *Eichhornia crassipes* es de buena calidad y considerando los criterios de Wangaard (1962); Britt (1970) y Tamarit, (1996), coinciden que una pulpa de buena calidad es aquella que presenta un valor (alto) en el coeficiente de flexibilidad y valores (bajos) en el índice de rigidez y en la relación de Runkel, y establecen que al aumentar el diámetro del lumen de las fibras se presenta una reducción en el grosor de las paredes, es decir en la rigidez, provocando un aumento en la flexibilidad de la fibra y a la vez una mayor tendencia al desarrollo de uniones entre las fibras, produciendo un volumen reducido de pulpa lo que provoca una elevada densidad y una hoja de buena formación, la cual tendrá las características de resistencia.

Es importante mencionar que la morfología e índices de calidad de la pulpa soló se realizó en las fibras, sin embargo *Eichhornia crassipes* está conformada por una cantidad considerable de otros elementos anatómicos finos como; células de parénquima y aerénquima (Mahmood *et al.*, 2005) que fueron retenidos en la malla <200 siendo casi la mitad del material total 47.83% (Tabla 39 y Figura 24).

**Tabla 38.** Resultados de la morfología de las fibras e índices de calidad de la pulpa de *Eichhornia crassipes* y comparativo con otros materiales fibrosos.

	Longitud ( $\mu\text{m}$ )	Diámetro ( $\mu\text{m}$ )	Diámetro del lumen ( $\mu\text{m}$ )	Grosor de la pared	Relación Runkel	Coefficiente de flexibilidad	Coefficiente de rigidez
Fibras de plantas acuáticas							
<b><i>Eichhornia crassipes</i></b>	<b>1161.5 (<math>\pm 47.34</math>)</b>	<b>7 (<math>\pm 4.54</math>)</b>	<b>5 (<math>\pm 4.14</math>)</b>	<b>1 (<math>\pm 0.97</math>)</b>	<b>Excelente para papel</b>	<b>Delgada</b>	<b>Delgada</b>
<i>Panicum repens</i> *	910	10.27	4.62	8.83	Regular	—	—
<i>Schoenoplectus californicus</i> *	1590	5.32	2.06	1.63	Regular	—	—
Fibras de tallo							
Bagazo de caña *	1500	20	12	4	Buena	Media	Media
Bambú <sup>■</sup>	1700	23.60	9.50	7	Regular	Muy delgada	Gruesa
Kenat *	1310	24.12	16.40	4.25	Buena	Delgada	—
Hoja de maíz *	1860	47.4	32.1	7.5	Muy buena	Delgada	Delgada
Fibras de semilla							
Algodón <sup>□</sup>	830	19.6	12.8	3.4	Buena	Muy delgada	—
Fibras de madera							
<i>Pinus leiophylla</i> *	3207.5	29.4	16.4	6.5	Buena	Media	Media
<i>Quercus laurina</i> *	1559.5	19.1	7.6	5.8	Regular	Gruesa	Gruesa

\*Joedodibroto *et al.* (1983), \*Shakhes *et al.* (2011), <sup>■</sup>Dharm *et al.* (2003), <sup>□</sup>Ververis *et al.* (2004), \*Prado *et al.* (2012), \*Vazques *et al.* (2010).

#### 7.4. Caracterización de la pulpa café de *Eichhornia crassipes* y pulpa industrial de *Pinus* spp.

Los resultados de la caracterización de la pulpa café kraft de *E. crassipes* y *Pinus* spp se presentan en la tabla 39 y en la figura 24 se aprecian gráficamente la clasificación de las fibras de ambas fibras. Los rendimientos de la pulpas celulósicas se mencionaron en el punto anterior de rendimientos del pulpeo kraft, en cuanto al porcentaje de cenizas de las pulpas fue mayor en la pulpa de *E. crassipes* al de pulpa de *Pinus* (Tabla 39), se ha reportado que la cenizas en la pulpa celulósica están conformadas por elementos inorgánicos como el calcio y magnesio por mencionar algunos que ocasionan problemas como incrustaciones y corrosión de los equipos en el proceso de pulpeo kraft (Rapson,1963; Grace *et al.*, 1996).

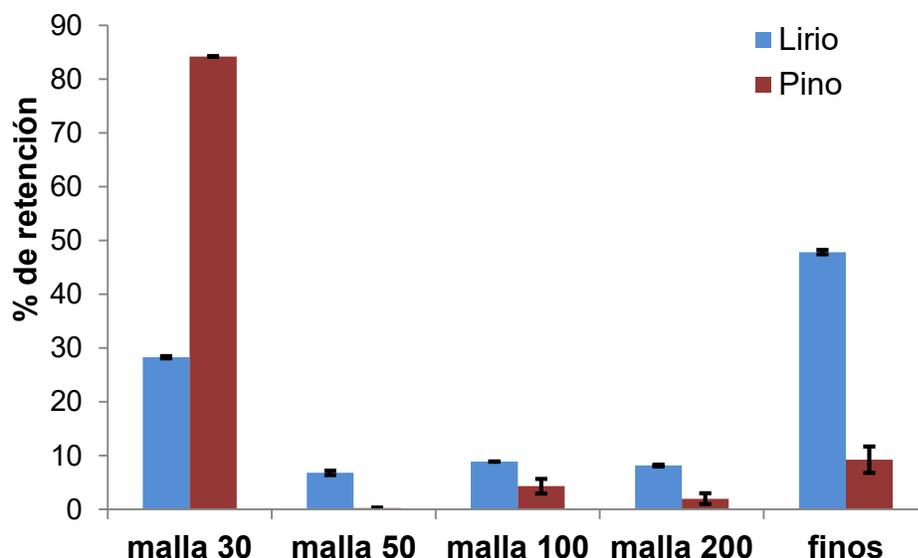
**Tabla 39.** Caracterización de la pulpa kraft café de *Eichhornia crassipes* y *Pinus* spp

<b>Determinación</b>	<b><i>E. crassipes</i></b>	<b><i>Pinus</i> spp</b>
Humedad (%)	69.42 (±0.02)	68.84 (±0.2)
Rendimiento (%)	26.36(±0.42)	----
Cenizas (%)	9.97(±1.8)	7.75 (±0.7)
Clasificación de fibras (%)		
malla 30	28.31(±0.19)	84.18 (±0.02)
malla 50	6.8 (±0.4)	0.26 (±0.08)
malla 100	8.88 (±0.02)	4.32 (±1.3)
malla 200	8.17 (±0.19)	1.98 (±1.01)
<200	47.83 (±0.41)	9.24(±2.44)
No. kappa	30.02 (±0.42)	30 (±0.1)
Viscosidad (cp)	10.12 (±0.07)	18.74 (±1.4)

La clasificación de las fibras en una alta proporción fue clasificada como finos para la pulpa de *E. crassipes* (47.83%), para la pulpa industrial de *Pinus* spp una alta proporción fue retenida en la malla 30 (84.18%), se ha reportado que el alto contenido de células finas de las hojas de *E. crassipes* desfavorece el drenado a través de los formadores de hojas (Bagnall *et al.*, 1974). Las fracciones retenidas puede proporcionar información sobre la degradación de la pulpa y de su composición celular (células fibrosas, células de parénquima y otros elementos celulares) (Escoto 2009). Sin embargo, los finos aumentan las zonas de contacto de las superficies celulósicas y mayor empaque de las fibras disminuyen en gran medida la libertad de drenado, pero también aumentan la resistencia a la tensión en la hoja de papel (Swanson y Steber, 1959; Casey, 1990; Young, 1991).

El No. de kappa de la pulpa de *E. crassipes* es igual al que presenta la pulpa industrial de *Pinus* spp (Tabla 39), sin embargo para alcanzar el mismo No. de kappa sólo se requirió 10% carga de reactivos, en pulpa kraft de *Pinus tecunumanii* y *Cupressus torulosa* también se han publicado valores iguales de kappa 30 (Juacida *et al.*, 2002; Torres *et al.*, 2005).

La viscosidad en *E. crassipes* fue menor a la pulpa industrial de *Pinus* spp (Tabla 39). En pulpeo kraft de *Pinus douglasiana* se ha reportado valores menores 12.6 (Rutiaga *et al.*, 1998) y mayores 34 en *Pinus tecunumanii* (Torres *et al.*, 2005), en cuanto a *E. crassipes* no se han reportado resultados sobre la viscosidad de su pulpa celulósica. Se ha escrito en la literatura que los procesos de pulpeo afectan el grado de polimerización de la celulosa (Casey, 1990).



**Figura 24.** Clasificación de fibras de la pulpa kraft café de *Eichhornia crassipes* y *Pinus* spp.

### 7.5. Blanqueo de la pulpa kraft mediante la secuencia O<sub>1</sub>O<sub>2</sub>D<sub>1</sub>(PO)D<sub>2</sub>HD<sub>3</sub>

En la tabla 40 se presentan los resultados de la secuencia de blanqueo aplicada a la pulpa kraft de *Eichhornia crassipes*, se puede observar que las etapas de blanqueo fueron drásticas ya que los rendimientos de pulpa y la viscosidad son bajos. Se ha escrito en la literatura que los procesos de blanqueo también demeritan el grado de polimerización de la celulosa y hemicelulosas (Rapson 1963; Casey, 1990; Suchy y Argyropoulos, 2002). La deslignificación con una y dos etapas de oxígeno se muestran en la tabla 40, se puede observar en base al No. de kappa inicial de 30 (Tabla 39) hubo una deslignificación del 66.86% en las pulpas sometidas a doble etapa con oxígeno, la cual es superior a la deslignificación en las pulpas sometidas a una sola etapa 50% (Suchy y Argyropoulos, 2002; Torres *et al.*, 2005), y estos valores están dentro del rango considerado adecuado para procesos de doble etapa con oxígeno aplicados a pulpas kraft de pino (Rutiaga *et al.*, 1998; Torres *et al.*, 2005). Como se puede apreciar en la tabla 40, con la primera aplicación de dióxido de cloro hubo una notable deslignificación en relación al No. de kappa inicial de la pulpa 15.16%, segunda etapa 4.56% y para la tercera sólo 1.93%, sin embargo la deslignificación solamente fue eficiente en la primera etapa y se respalda con lo que se ha

publicado donde se ha escrito que la aplicación de ClO<sub>2</sub> en la primera etapa la velocidad de este reactivo con la lignina es mayor y favorece la deslignificación (Eiras y Colodette, 2003). La etapa de blanqueo con peróxido-oxígeno sólo fue de 6.46%, sin embargo se ha reportado en pulpeos con estos agentes de blanqueo una eficiencia de deslignificación y reducción de número de kappa de 60% (Suchy y Argyropoulos, 2002). El porcentaje de cenizas disminuyó después de cada etapa de blanqueo pero aun al final persistió un alto porcentaje (Tabla 40). Finalmente el número de kappa fue cercano a cero lo cual esta correlacionado con una buena deslignificación, sin embargo la blancura de la pulpa de *Eichhornia crassipes* fue muy baja a comparación de pulpa kraft blanqueada mediante la secuencia OD<sub>1</sub>OPD<sub>2</sub> del arbusto *Ricinus communis* 82.22% (Escoto *et al.*, 2015) y de especies maderables de coníferas, 85.66% en *Pinus douglasiana* (Rutiaga *et al.*, 1998), y 90% en *P. tecunumanii* (Torres *et al.*, 2005). El bajo porcentaje de blancura en la pulpa celulósica de *E. crassipes* pudo ser ocasionado por el alto contenido de cenizas y su elementos inorgánicos, se ha escrito en la literatura que cantidades de silicio, hierro, cobre y manganeso (aproximadamente 1 microgramo por gramo de pulpa), aumentan la velocidad de oxidación de la celulosa y reaccionan con los agentes de blanqueo afectando el envejecimiento y producen color amarillento en la pulpa celulósica (Rapson, 1963; Grace *et al.*, 1996).

**Tabla 40.** Caracterización de la pulpa kraft de *Eichhornia crassipes* después de cada etapa de la secuencia de blanqueo

Determinación	O <sub>1</sub>	O <sub>2</sub>	D <sub>1</sub>	PO	D <sub>2</sub>	Desm	H	D <sub>3</sub>
Humedad (%)	76.04	74	70.76	69.89	70.02	70.02	68.33	70.02
Rendimiento (%)	68.14	70.47	84.27	87.34	82.94	88.30	97.24	78.23
No. kappa	16.27	9.94	5.39	3.45	2.08	--	0.62	0.04
pH final	8	9.91	5.31	9.40	5.22	4.60	10.59	4.30
Cenizas (%)	13.09	11.84	10.24	10.21	9.38	--	7.01	6.88
Viscosidad (cp)	--	--	--	--	--	--	--	6.43
Blancura (%)	--	--	--	--	--	--	--	57.96
Opacidad (%)	--	--	--	--	--	--	--	95.50

### 7.6. Evaluación de las propiedades físicomecánicas de la pulpa blanqueada de *Eichhornia crassipes*.

En la tabla 41 se muestran las propiedades físico mecánicas de la pulpa blanqueada de *Eichhornia crassipes* y el comparativo con pulpa blanqueada de *Ricinus communis* e industrial de *Pinus* spp. Los grados °SR de la pulpa blanqueada kraft de *E. crassipes* mediante la secuencia O<sub>1</sub>O<sub>2</sub>D<sub>1</sub>(PO)D<sub>2</sub>HD<sub>3</sub> son mayores a comparación de la pulpa blanqueada industrial de *Pinus* (Escoto *et al.*, 2015), y menores a 29°SR reportados en pulpa a la NaOH blanqueada por la secuencia en base a cloro (CEHH) por Joedodibroto *et al.* (1983), y similares a los de pulpa kraft y sosa blanqueada del arbusto *Ricinus communis*

°SR de 19 y 20 consecutivamente (Escoto *et al.*, 2015). En pulpas kraft de *Pinus douglasiana* sin refinar se ha reportado un °SR de 11 (Rutiaga *et al.*, 1998).

Las propiedades físico-mecánicas de las pulpas blanqueadas de lirio, higuera y pino son variadas aunque los °SR son distintos pero casi iguales en gramaje (Tabla 41), ahora bien las propiedades de porosidad, índice de rasgado, doblez y opacidad son mayores en la pulpa blanqueada de *Eichhornia crassipes* a comparación del arbusto *Ricinus communis* y la pulpa industrial de *Pinus* spp (Tabla 41) y menores en índice de tensión e índice de explosión y blancura (Escoto *et al.*, 2015). Se ha publicado que después del blanqueo se produce una pérdida de resistencia de la pulpa (Suchy y Argyropoulos, 2002), por otro lado la eliminación de la lignina después del blanqueo puede aumentar la capacidad de unión de la superficie de la fibra, mejora la flexibilidad de la fibra, incrementa la facilidad con la que la superficie puede ser fibrilada, y aumentar el área superficial de la fibra (Rapson, 1963).

**Tabla 41.** Resultados de las propiedades físico-mecánicas de la pulpa blanqueada de *Eichhornia crassipes* y comparativo con pulpa blanqueada *Ricinus communis* y fibra larga industrial de *Pinus* spp.

Ensayo realizado	<i>Eichhornia crassipes</i>	<i>Ricinus communis</i> [♦]	Fibra larga industrial de <i>Pinus</i> spp [♦]
Tiempo de refinación (min)	<b>0</b>	0	0
Tiempo de drenado (seg)	<b>75</b>	---	---
°Schopper Riegler (°SR)	<b>21</b>	19	14
Gramaje (g/m <sup>2</sup> )	<b>59.68 (±0.5)</b>	60.04	60.04
Espesor (mm)	<b>0.08 (±0.9)</b>	---	---
Porosidad (seg/100)	<b>53.3 (±4.1)</b>	0.59	0.20
Índice de tensión (N.m/g)	<b>48.65 (±0.4)</b>	56.64	74.68
Índice de explosión (kpa.m <sup>2</sup> /g)	<b>4.10 (±0.33)</b>	3.38	3.04
Índice de rasgado (N.m <sup>2</sup> /g)	<b>10.52(±0.5)</b>	4.88	8.74
Dobleza (No.)	<b>1274 (±7.7)</b>	198	268
Blancura (%)	<b>57.96 (±1)</b>	79.66	81.02
Opacidad (%)	<b>95.50 (±0.4)</b>	86.83	77.66

[♦]Escoto *et al.* (2015)

## 7.7. Evaluación de las propiedades físico-mecánicas en hojas estándar de pulpa café de *E. crassipes*, pulpa industrial de *Pinus* spp y mezclas Lirio-Pino.

### 7.7.1. Curva de refinación de la pulpa kraft de *Eichhornia crassipes* y pulpa industrial de *Pinus* spp.

Los tratamientos de los tiempos de refinación entre las fibras de *Eichhornia crassipes* (fibras cortas) y *Pinus* (fibras largas), en general, presentan diferentes efectos debidos, principalmente, a la morfología celular y a la longitud de la fibra; por lo regular, el tamaño de la fibra larga (*Pinus*) varía entre 2 800 y 3 200  $\mu\text{m}$  de longitud, y el tamaño de las fibras cortas de *Eucalyptus* spp y *Quercus* spp, por ejemplo, se ubica en un intervalo de 863.6 y 1519  $\mu\text{m}$  (Tamarit 1996; Igartúa y Monteoliva, 2010). Las fibras de *E. crassipes* son de 1161.5  $\mu\text{m}$  por lo tanto están dentro de rango de las fibras cortas, aunado ante la alta proporción de finos 47.83% durante la clasificación de fibras (Tabla 39); por ello es necesario aplicar menor energía a las pulpa de *E. crassipes*, y mayor energía en el tratamiento de refinación en la pulpa industrial de *Pinus* spp (Tablas 42 y 43), para lograr una fibrilación interna y externa que mejore las características físicomecánicas del papel.

Los resultados de la evaluación físicomecánica de las mezclas de pulpa kraft de Lirio-Pino se reúnen en las tablas 44 y 45: estas pulpas mezcladas no se evaluaron como curva de refinación, solamente se tomaron los tiempos de refinación y de propiedades óptimas, tanto de las pulpas de *E. crassipes* como la pulpa industrial de *Pinus* spp.

Las propiedades de la pulpa de *Eichhornia crassipes* se presentan 42 en la tabla se aprecia que los índices de tensión, explosión rasgado y doblez son similares en pulpa sin refinar y a los 10 minutos de refinación. A partir de que no existen grandes diferencias entre los resultados de la pulpa de la pulpa de *E. crassipes* sin refinar y al tiempo óptimo de refinación a 10 minutos, y por el ahorro de energía en el tratamiento de refinación, se optó por seleccionar la pulpa sin refinar de *E. crassipes* para los porcentajes de mezclas Lirio-Pino (20-80, 40-60, 60-40 y 80-20) y 40 minutos para la pulpa Kraft industrial de *Pinus* spp.

En las tablas 42 y 43 explican el comportamiento que tiene la drenabilidad de las fibras de *E. crassipes* y *Pinus* spp a diferentes tiempos de refinación, en un inicio parece proporcional el incremento de tiempo con la disminución de drenabilidad, hasta llegar a un punto donde la disminución de la drenabilidad es mayor, esto puede explicarse debido al trabajo mecánico que sufre la pulpa al ser refinada se fibrila y obstruye el paso libre del agua a través de ellas (Casey 1990). Se ha publicado también un incremento en los °SR en pulpa a la NaOH de *E. crassipes* en pulpas sin refinar se obtuvieron °SR de 35 y a 10 minutos de batido °SR 54 por Joedodibroto *et al.*, (1983).

**Tabla 42.** Propiedades físico-mecánicas de la pulpa kraft de *Eichhornia crassipes*.

<b>Refinación en <i>E. crassipes</i></b>	<b>punto 1</b>	<b>punto 2</b>	<b>punto 3</b>	<b>punto 4</b>	<b>punto 5</b>
Tiempo de refinación (min)	0	2.5	5	7.5	10
Tiempo de drenado (seg)	95	107.58	128.09	152.48	132
Schopper Riegler (°SR)	26	31	38	40	44
Gramaje (g/m <sup>2</sup> )	59.68	59.68	59.68	59.68	59.68
Espesor (mm)	0.09	0.09	0.09	0.08	0.07
Porosidad (seg/100)	1800	1800	1800	1800	1800
Índice de tensión (N.m/g)	38.98	33.2	34.01	31.68	40.51
Índice de explosión (kpa.m <sup>2</sup> /g)	2.63	2.95	1.97	1.97	2.63
Índice de rasgado (N.m <sup>2</sup> /g)	3.28	2.63	2.63	1.97	1.97
Doblez (No.)	81	102	78	43	67
Opacidad (%)	97.48	97.40	97.43	96.84	97.15
Blancura (%)	6.41	6.56	6.37	5.89	6.42

**Tabla 43.** Propiedades físico-mecánicas de la pulpa kraft industrial de *Pinus* spp.

<b>Refinación en <i>Pinus</i> spp.</b>	<b>punto 1</b>	<b>punto 2</b>	<b>punto 3</b>	<b>punto 4</b>	<b>punto 5</b>
Tiempo de refinación (min)	0	20	40	60	80
Tiempo de drenado (seg)	7	20	60.05	75	80
Schopper Riegler (°SR)	9	11	18	43	58
Gramaje (g/m <sup>2</sup> )	59.68	59.68	59.68	59.68	59.68
Espesor (mm)	0.2	0.12	0.11	0.1	0.11
Porosidad (seg/100)	0.24	2.09	3.52	34.5	1483.2
Índice de tensión (N.m/g)	26.61	67.66	81.53	81.82	81.31
Índice de explosión (kpa.m <sup>2</sup> /g)	2.63	5.42	5.75	5.75	5.91
Índice de rasgado (N.m <sup>2</sup> /g)	19.72	13.15	10.52	9.20	9.20
Doblez (No.)	11	1461	1609	1385	1075
Opacidad (%)	90.17	91.31	92.02	92.29	92.33
Blancura (%)	17.07	13.83	12.62	12.15	11.63

**Tabla 44.** Propiedades físico-mecánicas de las mezclas de pulpa kraft Lirio-Pino sin refinar

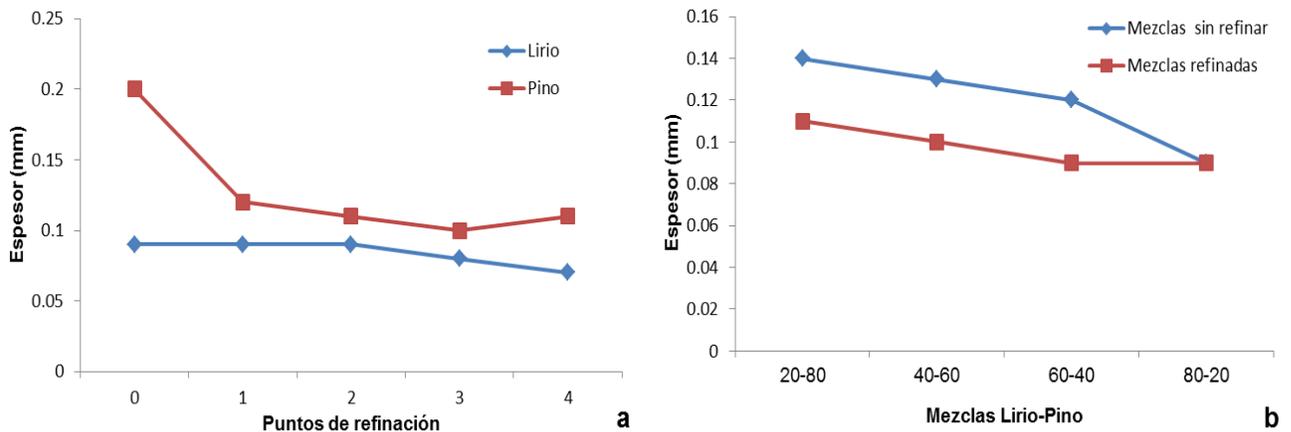
<b>Mezclas Lirio-Pino (%) sin refinar</b>	<b>20-80</b>	<b>40-60</b>	<b>60-40</b>	<b>80-20</b>
Tiempo de refinación (min)	0	0	0	0
Tiempo de drenado (seg)	3.56	84.49	96.53	133.32
Schopper Riegler (°SR)	14	23	24	36
Gramaje (g/m <sup>2</sup> )	59.68	59.68	59.68	59.68
Espesor (mm)	0.14	0.13	0.12	0.09
Porosidad (seg/100)	6.59	133.12	1800.14	2100
Índice de tensión (N.m/g)	48.87	52.43	53.69	53.69
Índice de explosión (kpa.m <sup>2</sup> /g)	4.43	4.60	3.94	3.61
Índice de rasgado (N.m <sup>2</sup> /g)	14.46	9.20	5.26	3.50
Doblez (No.)	579	497	422	259
Opacidad (%)	91.48	92.09	93.35	95.23
Blancura (%)	10.55	8.86	8.29	7.87

**Tabla 45.** Propiedades físico-mecánicas de las mezclas de pulpa kraft Lirio-Pino refinadas.

<b>Mezclas Lirio-Pino (%) refinadas</b>	<b>20-80</b>	<b>40-60</b>	<b>60-40</b>	<b>80-20</b>
Tiempo de refinación Lirio-Pino (min)	0-40	0-40	0-40	0-40
Tiempo de drenado (seg)	93.21	93.21	103.39	96.31
Schopper Riegler (°SR)	28	40	32	26
Gramaje (g/m <sup>2</sup> )	59.68	59.68	59.68	59.68
Espesor (mm)	0.11	0.1	0.09	0.09
Porosidad (seg/100)	233.35	1208.34	1800	1800
Índice de tensión (N.m/g)	87.66	67.94	48.31	43.83
Índice de explosión (kpa.m <sup>2</sup> /g)	6.57	5.26	3.61	2.46
Índice de rasgado (N.m <sup>2</sup> /g)	13.1	7.89	10.52	7.01
Doblez (No.)	1144	610	445	166
Opacidad (%)	92.04	93.32	94.57	96.05
Blancura (%)	10.55	8.86	8.29	7.87

### 7.7.2. Espesor

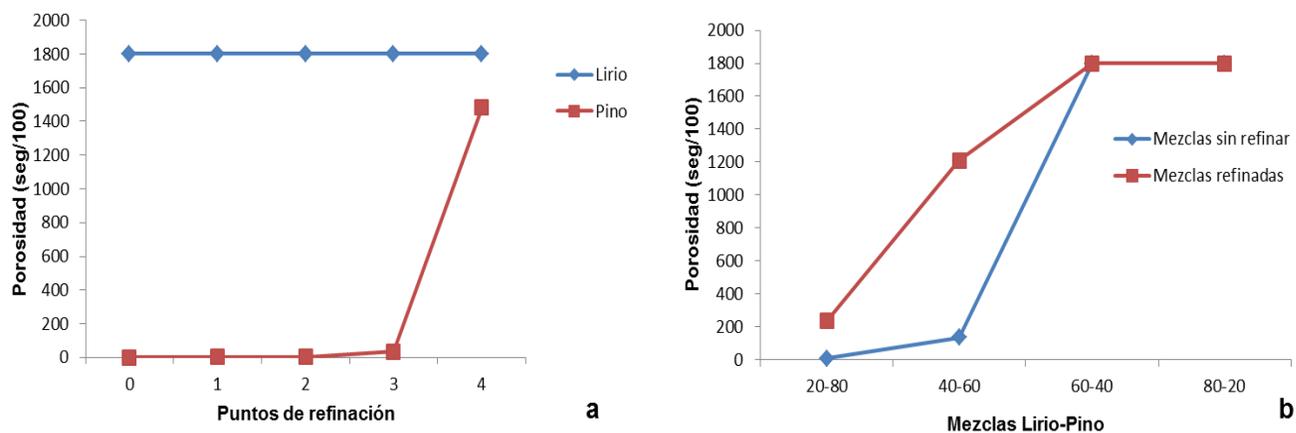
El espesor disminuyó al aumentar el tiempo de refinación, esto es congruente con la literatura (Casey 1990), mientras la fibra celulósica tenga mayor tiempo de refinación, el espacio existente entre ellas va desapareciendo obteniendo así valores menores de espesor. El espesor fue menor en la pulpa de *E. crassipes* en todos sus puntos de refinación a comparación de la pulpa industrial de *Pinus* spp, en las mezclas hubo una tendencia similar solo que las pulpas refinadas tuvieron menor espesor a comparación de mezclas no refinadas esto se describe en las tablas 42 y 43 y gráficamente en la figura 25. Es conocido que al aumentar el gramaje de la hoja el espesor aumenta, tal es el caso en hojas de gramaje de 85.3 a 100 g/m<sup>2</sup> formadas a partir de otras plantas acuáticas presentan espesores de 0.16 a 0.24mm en *Cyperus papyrus* y a valores que oscilan de 0.2 a 0.29mm en hojas de gramajes de 90.1 a 98.1 g/m<sup>2</sup> en *Typha dominguensis* (Escoto et al., 2013).



**Figura 25.** Comportamiento del espesor en la pulpa café **a)** *E. crassipes* y *Pinus* spp industrial, **b)** mezclas de pulpa café lirio-pino.

### 7.7.3. Porosidad

Las hojas de la pulpa kraft de *E. crassipes* se comportaron como material no poroso, es decir la resistencia al paso del aire es alta, en contraparte las hojas de pulpa industrial de *Pinus* spp son porosas (Tablas 42 y 43. Figura 26), luego, a mayor grado de refinación, la porosidad, es decir la resistencia al paso del aire, tiende a aumentar debido a que el área de contacto de las fibras aumenta (Swanson y Steber, 1959; Casey, 1991b), en las mezclas Lirio-Pino fue incrementando la resistencia al paso de aire al incrementar el porcentaje de adición de la pulpa de *E. crassipes* (Tablas 44, 45 y Fuga 26b). En pulpas obtenidas con NaOH sin refinar de otras plantas acuáticas han presentado menor resistencia al paso de aire con valores que oscilan entre 45 y 298 seg/100 en *Cyperus papyrus*, y a 1 a 15.3 seg/100 en *Thypha dominguensis* (Escoto et al., 2013).

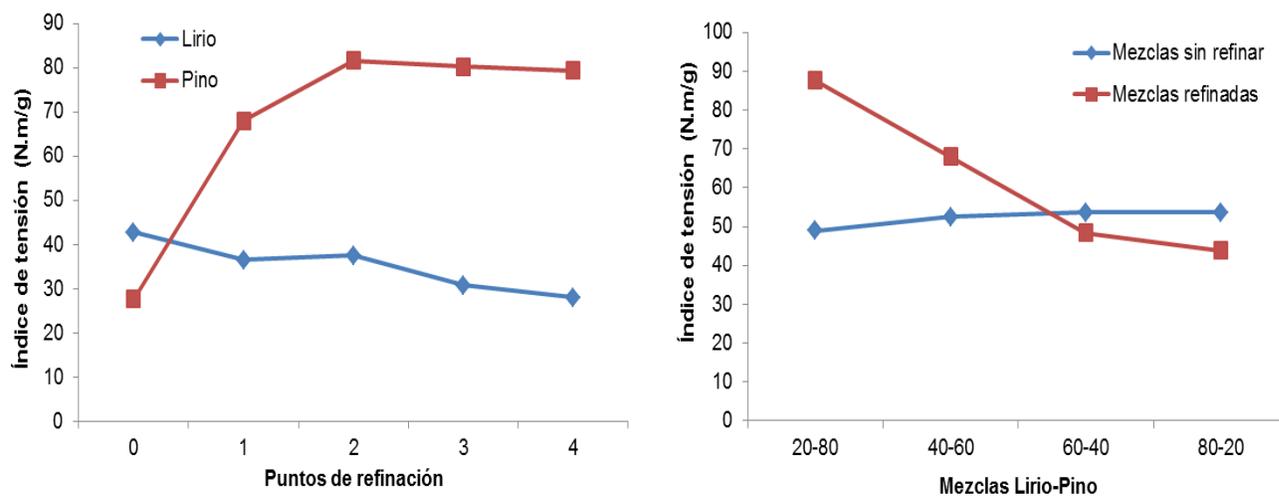


**Figura 26.** Comportamiento de la porosidad en la pulpa café **a)** *E. crassipes* y *Pinus* spp industrial, **b)** mezclas de pulpa café lirio-pino.

#### 7.7.4. Índice de tensión

En las tablas 42, 43 y en la figura 27 se ilustran el comportamiento del índice de tensión donde se aprecia que la pulpa de *Pinus* spp presenta mayor resistencia a la tensión a comparación de la pulpa de *Eichhornia crassipes*. En otra investigación sobre la pulpa kraft de *E. crassipes* sin refinar han reportado valores mayores de índice de tensión 50 N.m/g por Atanu *et al.* (2013). En cuanto a las mezclas Lirio-Pino, las mezclas refinadas presentaron valores mayores en las dos primeras adiciones a comparación de las mezclas sin refinar. Sin embargo, en las mezclas al adicionar 20% de pulpa de *E. crassipes* incrementa considerablemente la resistencia al índice de tensión a comparación del punto óptimo para la pulpa industrial de *Pinus* ssp. La tendencia que se observa en la figura 27(b) indica que aproximadamente a un 30% de adición de la pulpa de *E. crassipes* presenta índice de tensión similar al de la pulpa industrial de *Pinus* spp. El índice de tensión es una de las propiedades más exigidas para producir papeles para diversas finalidades (Casey 1990; Torres *et al.*, 2005). La pulpa industrial de *Pinus* spp presenta un comportamiento como el que se explica en la literatura, ya que, conforme incrementa el tiempo de refinado la pulpa se va fibrilando, logrando establecer enlaces entre ellas aumentando con esto la resistencia expresada como índice de tensión, pero llega un punto máximo de desarrollo de resistencias y a partir de ahí solamente se degrada la pulpa celulósica y se pierde la resistencia lograda (Swason y Steber 1959; Casey 1990). Entonces, una explicación al uso de la pulpa kraft de *E. crassipes* del porque ayuda a incrementar el índice de tensión al ser mezclada con pulpa refinada industrial de *Pinus* spp, puede ser porque es compatible con las fibras, pudiendo así favorecer el desarrollo de enlaces entre estos materiales; además, es de suponerse que la pulpa de *E. crassipes* actúa como finos que se entrelazan con las fibras de *Pinus* spp, aumentando así el área de contacto, es decir, la superficie dispuesta para la unión y si esto sucede, como lo mencionan Swanson y Steber (1959) y Young (1991), la resistencia a la tensión se incrementa. Algunos autores (Thomson *et al.*, 1953; Clark, 1969) han encontrado que las hemicelulosas actúan como adhesivos ayudando a que los papeles tengan mayor resistencia, ya que el enlace entre fibras se mejora porque aumenta el contacto entre las superficies que contienen grupos hidroxilo. El índice de tensión en la pulpa kraft de *E. crassipes* está dentro del rango 22.24 a 57.45 Nm/g

reportado en otra planta acuática en hojas de pulpas obtenidas con NaOH sin refinar a mayores gramajes de *Cyperus papyrus* y mayor que el rango 3.83 a 23.78 Nm/g en *Typha dominguensis* por Escoto *et al.* (2013). La determinación y el conocimiento de la propiedad índice de tensión indican la aptitud de algunos papeles a ser usados como envolturas, bolsas, cintas engomadas para empaques, tissue y algunos otros, los cuales normalmente están sujetos a esfuerzos directos de tensión (Escoto 1989).

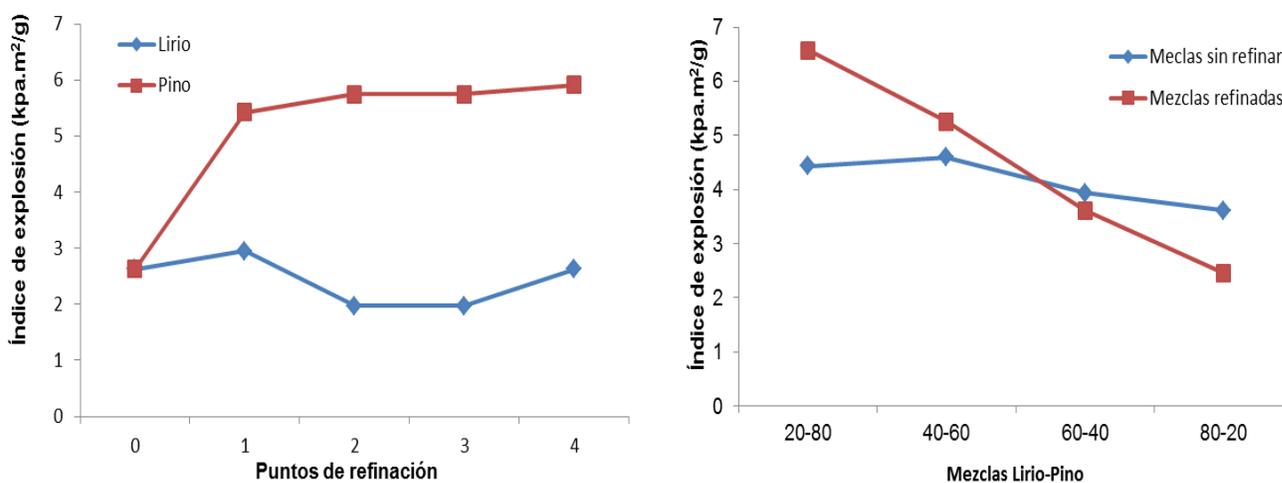


**Figura 27.** Comportamiento de índice de tensión en la pulpa café **a)** *E. crassipes* y *Pinus* spp industrial, **b)** mezclas de pulpa café lirio-pino.

#### 7.7.5. Índice de explosión

Los valores de índice de explosión están registrados en las tablas 42, 43 y en la figura 28. Los valores de explosión fueron mayores en la pulpa industrial de *Pinus* spp a comparación de la pulpa kraft de *E. crassipes* y fueron aumentando al incrementar el tiempo de refinación, esto es congruente con la literatura donde se ha escrito que el índice de explosión va aumentando con la refinación, al promover una separación de las capas concéntricas del interior de la pared de la fibra aumentando con ello el área de contacto (Swanson y Steber 1959; Casey 1991). En cuanto a las mezclas Lirio-Pino, las mezclas refinadas presentaron mayor resistencia a la explosión a comparación de las no refinadas (Tablas 44, 45 y Figura 28b), y al adicionar 20% de pulpa kraft de *E. crassipes* a la pulpa industrial el índice de explosión es mayor al 100% de la pulpa industrial de *Pinus* spp y se presentan valores similares en la mezcla Lirio-Pino 40-60 a los de la pulpa industrial. En otra planta acuática se han publicado en hojas de mayor gramaje de *Cyperus papyrus* valores mayores de índice de explosión en pulpas obtenidas con NaOH que oscilan entre 1.91 a 4.09 kpa.m<sup>2</sup>/g, y menores valores que oscilan 0.2 a 1.24 kpa.m<sup>2</sup>/g en *Typha dominguensis* por Escoto *et al.*, (2013). La resistencia a la explosión de papeles y cartones es una mediada compuesta por ciertas propiedades en la estructura del papel, principalmente la resistencia a la tensión y elongación, esta propiedad configura un criterio

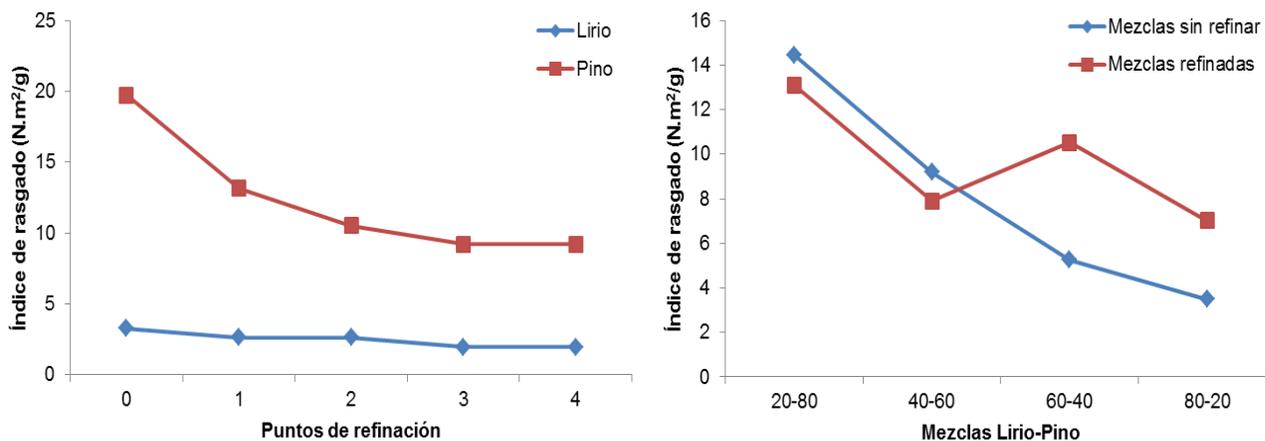
importante de calidad para los papeles que se usan en bolsas y empaques (Escoto *et al.*, 1989).



**Figura 28.** Comportamiento de índice de explosión en la pulpa café **a)** *E. crassipes* y *Pinus* spp industrial, **b)** mezclas de pulpa café lirio-pino.

#### 7.7.6. Índice de rasgado

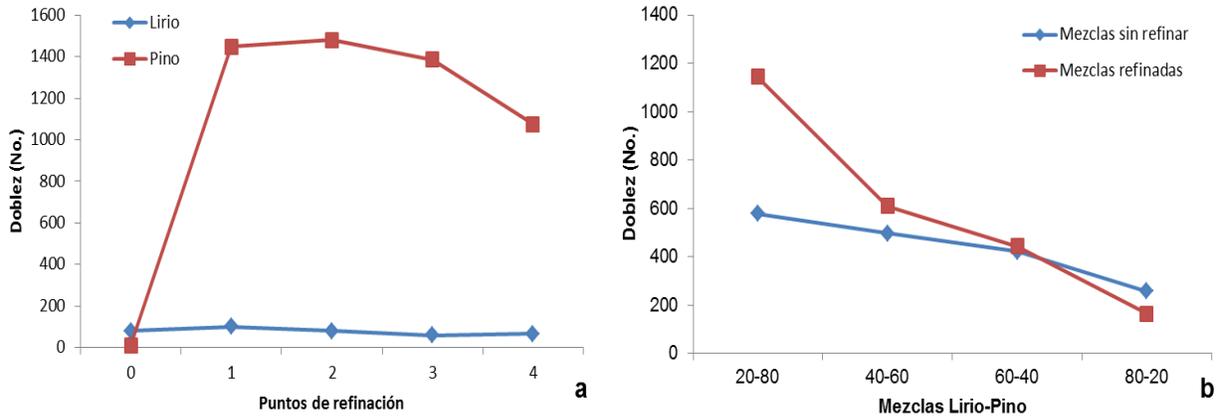
Los valores de índice de rasgado se presentan en las tablas 42 y 43 y gráficamente en la figura 29. La mayor resistencia al rasgado se presentó en la pulpa industrial de *Pinus* spp a comparación de la pulpa de *Eichhornia crassipes*, en otra investigación se han registrado valores mayores de rasgado que van de 1.5 a 2 N.m<sup>2</sup>/g en pulpa kraft sin refinar de la misma planta acuática por Atanu *et al.* (2013). La resistencia al rasgado disminuyó al aumentar el tiempo de refinación, sin embargo, otros autores han reportado que la resistencia al rasgado aumenta con la refinación (Rodríguez 1970; Casey 1991), esta anomalía podría ser ocasionada debido a la refinación, la hoja aumenta su unión y rigidez, y esto tiende a concentrar la resistencia al rasgado en una zona más pequeña, obteniendo finalmente valores más bajos de rasgado (Brandon, 1991). En cuanto a las mezclas Lirio-Pino 20-80% el índice de rasgado es similar a los 20 minutos de refinación de la pulpa industrial de *Pinus* spp, el índice de rasgado de las mezclas Lirio-Pino disminuyó al aumentar la adición de la pulpa de *E. crassipes*, las mezclas no refinadas tuvieron un comportamiento variado. En pulpas sin refinar obtenidas con NaOH de otras plantas acuáticas y en hojas elaboradas de mayor gramaje se lograron mayores valores de índice de rasgado que oscilan entre 5.79 a 8.03 N.m<sup>2</sup>/g en *Cyperus papyrus*, y 3.02 a 6.21 N.m<sup>2</sup>/g en *Typha dominguensis* por Escoto *et al.* (2013). El índice de rasgado es una propiedad junto con la resistencia a la tensión y explosión, proporcionan un criterio claro para establecer las condiciones de operación y manejo de los sacos de papel que se emplean como embalajes (Escoto 1989).



**Figura 29.** Comportamiento de índice de tensión en la pulpa café **a)** *E. crassipes* y *Pinus* spp industrial, **b)** mezclas de pulpa café lirio-pino.

#### 7.7.7. Dobleces

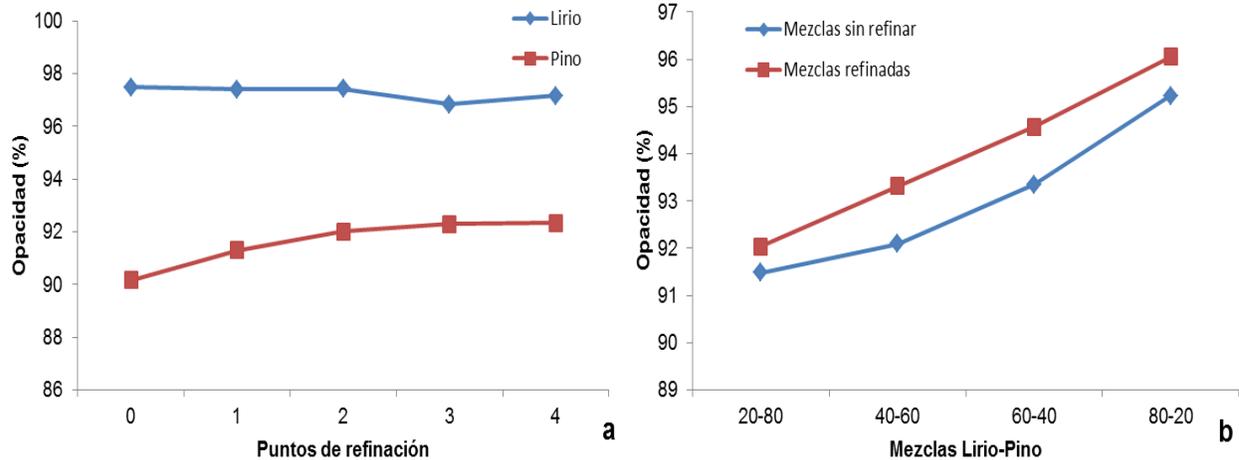
El No. de dobleces es mayor en la pulpa industrial de *Pinus* spp con gran diferencia a comparación de la pulpa kraft de *Eichhornia crassipes*. En cuanto a las mezclas Lirio-Pino presentaron mayor resistencia las mezclas refinadas a comparación de las no refinadas, y fue descendiendo el No. de dobleces al aumentar el porcentaje de adición de la pulpa de *E. crassipes* (Tablas 44 y 45, Figura 30). La tendencia de las pulpas refinadas coincide con la literatura donde se ha escrito que la resistencia al dobleces aumenta con el refinado gracias a que con ello se produce un aumento en la superficie específica y flexibilidad de las fibras provocando una mejor unión entre ellas (Casey 1990). La pulpa kraft de *E. crassipes* en sus cinco puntos de refinación presentó valores similares de No. de dobleces a la pulpa obtenida con NaOH sin refinar con valores que oscilan de 1 a 107 en *Cyperus papyrus*, y mayores a los valores 0 a 4 reportados en *Typha dominguensis* por Escoto *et al.*, (2013). La propiedad de resistencia al dobleces indica la aptitud de un papel a ser doblado o arrugado sin sufrir roturas o enmendaduras por un buen periodo de tiempo. Sin embargo no todos los papeles requieren de una buena resistencia al dobleces, por lo que esta característica se procura en papeles que requieren vigencia de uso y circulación más o menos largas, tal es el caso del papel moneda y seguridad (Escoto 1989).



**Figura 30.** Comportamiento del No. de dobléz en la pulpa café **a)** *E. crassipes* y *Pinus* spp industrial, **b)** mezclas de pulpa café lirio-pino.

### 7.7.8. Opacidad

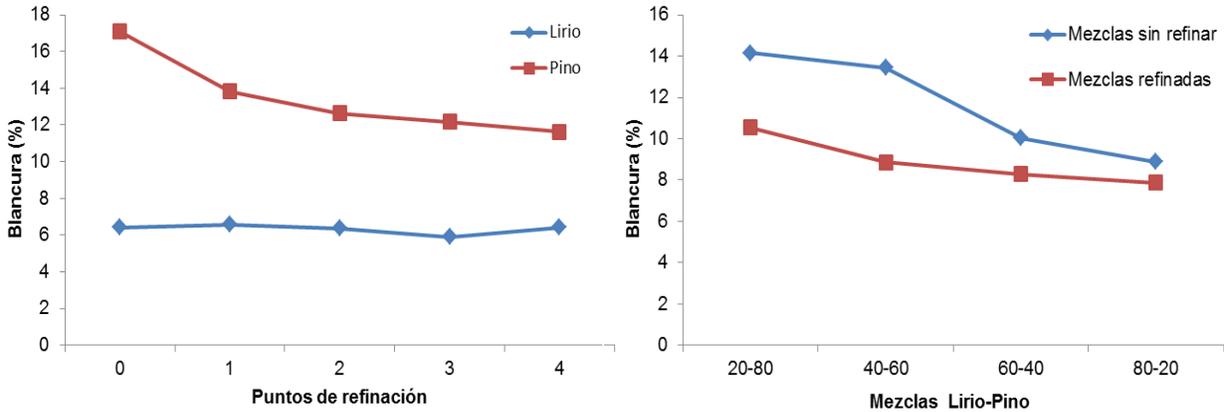
La opacidad fue mayor en la pulpa karft de *Eichhornia crassipes* a comparación de la pulpa industrial de *Pinus* spp (Tablas 42, 43 y Figura 31), en cuanto el efecto de la refinación sobre la opacidad la pulpa de lirio presento una tendencia lineal, la de pino aumento ligeramente al aumentar la refinación pero en el tercer punto también se comportó de forma lineal (Figura 31a), sin embargo se ha escrito que la refinación disminuye la opacidad, dando origen a que el papel sea más traslucido (Brandon 1991; Casey 1991b). En cuanto a las mezclas de pulpa Lirio-Pino la opacidad fue mayor en las mezclas refinadas a comparación de las no refinadas, y fue aumentando para ambos casos al aumentar el porcentaje de adición de la pulpa de *E. crassipes* (Figura 31b). La opacidad del papel se ve afectada por muchos factores y tomando en cuenta la teoría de Kubelka Munk, cualquier cosa que aumente la fuerza de dispersión o la absorción aumentara la opacidad. La hidrólisis de las cadenas de celulosa y hemicelulosas ocasionadas por los reactivos de pulpeo y blanqueo o el grado de refinación provocan un ablandamiento en la pared celular, volviendo las fibras más flexibles y favoreciendo una mejor compactación en el momento de la formación de la hoja. Este fenómeno reduce los espacios con aire al interior de la hoja, ocurriendo una disminución de las interfaces de refracción de luz y consecuentemente una reducción de la opacidad. Pulpa no refinada y con mayor número de fibras por gramo posee mayores coeficientes de dispersión de luz; entretanto, esta propiedad es inversamente proporcional al grado de refinación de la pulpa (Brandon 1991; Rutiaga *et al.*, 1998; Torres *et al.*, 2005).



**Figura 31.** Comportamiento de la opacidad a) *E. crassipes* y *Pinus spp* industrial, b) mezclas de pulpa café lirio-pino.

#### 7.7.9. Blancura

El porcentaje de blancura fue mayor en la pulpa industrial de *Pinus spp* a comparación de la pulpa de *Eichhornia crassipes*, el efecto del grado de refinación sobre la blancura tuvo un comportamiento casi lineal en la pulpa de lirio, para la pulpa industrial de pino fue disminuyendo el porcentaje de blancura al incrementar el tiempo de refinación (Tablas 42, 43 y Figura 32), La pulpa kraft de *E. crassipes* es de color muy oscuro lo que coincide con lo publicado donde declaran que durante el proceso de cocción la pulpa de *E. crassipes* se oscurece (Bagnall *et al.*, 1974). En cuanto a las mezclas Lirio-Pino las mezclas sin refinar presentaron mayores valores de blancura a comparación de las refinadas, y la blancura disminuyo al aumentar el porcentaje de adición de la pulpa de *E. crassipes* (Tablas 44, 45 y Figura 32). La blancura se afecta con la refinación, disminuye a media que esta aumenta, siendo este uno de tantos factores que la afectan, debido a que al producirse una mayor área de contacto se reduce el número de veces que la luz pasa de una fibra al aire y viceversa, así como de una fibra a otra, disminuyendo con su refinación (Brandon 1991; Casey 1991b; Rutiaga *et al.*, 1998).



**Figura 32.** Comportamiento de la blancura en la pulpa café a) *E. crassipes* y *Pinus* spp industrial, b) mezclas de pulpa café lirio-pino.

## 8. Conclusiones

La biomasa de *Eichhornia crassipes* contiene muchas sustancias útiles a demás pudiera ser viable debido a su abundancia, rápido crecimiento, y porque no tiene costo comercial como materia prima a comparación de la madera que tiene costo por volumen.

### Propiedades físicas y químicas de la biomasa de *Eichhornia crassipes*.

Posee un contenido de humedad excedente que aumenta el peso de las plantas. Las cenizas sus elementos químicos y extraíbles afectan el rendimiento además pueden ocasionar problemas durante la fabricación de pasta celulósica. Contiene bajos porcentajes de lignina lo que contribuye a su rápida deslignificación, su biomasa contiene bajo contenido de celulosa y cuenta con otros carbohidratos como hemicelulosas que pueden contribuir a las propiedades de resistencia del papel.

### Pulpeo Kraft, morfología e índices de calidad de la pulpa celulósica

Los rendimientos del pulpeo del lirio acuático fueron bajos, en cuanto a los porcentajes de rechazos generalmente son bajos, los números de kappa son similares a los reportados en pulpas celulósicas de algunas especies maderables, el contenido de cenizas de la pulpa después de las cocciones fueron altos, el álcali residual fue menor con 10% de carga de reactivos a comparación de 20%, el pH del licor negro tuvo la misma tendencia, lo que indica que con 10% de carga de reactivos es suficiente para la cocción y obtener el máximo rendimiento, a mayor carga de reactivos el porcentaje de solido totales fue mayor, su morfología indica que presenta fibras cortas y los índices de calidad de la pulpa celulósica de *E. crassipes* demuestran que es excelente para papel.

### **Blanqueo de la pulpa kraft mediante la secuencia O<sub>1</sub>O<sub>2</sub>D<sub>1</sub>(PO)D<sub>2</sub>HD<sub>3</sub>**

En cuanto a la secuencia de blanqueo que se aplicó resultaron bajos rendimientos y viscosidad, alto contenido de cenizas, finalmente bajo porcentaje de blancura. Aunque la celulosa blanqueada resulto ser poco viable, existen en el mercado diversos papeles y cartones como los de embalajes que no requieren pulpa celulósica blanqueada.

### **Evaluación físico-mecánica de hojas estándar**

Las propiedades físico-mecánicas de *E. crassipes* fueron menores a las de pulpa industrial de *Pinus* spp, las mezclas Lirio-Pino refinadas presentaron mejores propiedades a comparación de las que no se refinaron, sin embargo, la adición de pulpa de un 20-80% Lirio-Pino incrementa considerablemente las propiedades de resistencia y aproximadamente un 30-70% tiende a presentar propiedades similares a las de la pulpa de *Pinus* spp.

En resumen la biomasa de *Eichhornia crassipes* puede complementar en ciertas cantidades a las fibras celulósicas para papel artesanal.

## 9. Bibliografía

Agarwal A, Bansal A, Ansari M N, Jain M C and Upadhyaya J S (1992) Non-wood fibrous plants for pulp and paper manufacture (*Adhatoda basica*, *Ipomea carnea* and *Ricinus communis*) a chemical and anatomical studies. *Chemical Acta Turcica* 20 (3): 253-258.

Atanu Kumar D, Subir Kumar B, Mousa Nazhad M (2013) Pulp quality of banana plant (*Musa sapientum*) and kachuripana (*Eichhornia crassipes*) for papermaking. LAP Lambert Academic Publishing, Germany. 36-68.

Atchison J E (1996) Twenty-five years of global progress in nonwood plant fiber repulping, *Tappi J*, 79 (10): 87-95.

Alvarado Díaz J, Zubieta Rojas T, Ortega Murillo R, Chacón A, Espinoza R (1984) Hipertroficación en un lago tropical somero (Lago de Cuitzeo, Michoacán, México). *Revista Biológicas. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo* 1: 1-22.

Arjenaki F G, Jabbari R and Morshedi A (2012) Evaluation of drought stress onr elative water content, chlorophyll content and mineral elements of wheat (*Triticum aestivum* L.) varieties. *Int. J. Agric. Crop Sci.* 4: 726–729.

ASTM D 1103-60 (1978). Método estándar para determinar  $\alpha$ -celulosa en la madera. USA.

Avila Calderon L E A, Rutiaga Quiñones J G (2015) Wood chemical components of three species from a medium deciduous forest. *Wood research*, 60 (3): 463-470.

Balasubramanian D, Arunachalam K, Arunachalam A, Das A K (2013) Water hyacinth [*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms.] engineered soil nutrient availability in a low-land rain-fed rice farming system of north-east India. *Ecological Engineering*, 58: 3–12.

Backman R, Skrifvars B J, Hupa M, Siiskonen P and Mäntyniemi J (1995) Flue gas chemistry in recovery boilers with high levels of chlorine and potassium. *Proc. International Chemical Recovery Conference, Toronto, CPPA*, 95–103.

Bagnall L O, Furman T de S, Hentges J F, Jr. Nolan W J, y Shirley R L (1974) Feed and Fiber from effluent – grown water hyacinth. *Wastewater use in the production of food and fiber – proceedings, Environmental protection technology series, Agency Washinton, D.C. USA, Serie EPA-660/2-74-041.* 116-141.

Bhattacharya A, y Kumar P (2010) Water hyacinth as a potential biofuel crop. *EJEAFChe*, 9 (1): 112-122.

Benítez R, Calero V, Peña E, Martín J (2011) Evaluación de la cinética de la acumulación de cromo en el buchón de agua (*Eichhornia crassipes*). *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 9 (2): 66-73.

Berwyn B T (1970) Pulp properties. In: Kenneth W. Britt. *Handbook of pulp and paper technology*. Van Nostrand Reinhold Company. Nueva York. Cap. 3-9: 225-262.

Bergier I, Salis S M, Miranda C H B, Ortega E, Luengo C A (2012) Biofuel production from water hyacinth in the Pantanal wetland. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 12(1): 77-84.

Brandon C E (1991) Propiedades del papel. En: *Pulpa y papel química y tecnología química*. James P Casey. Vo. III, cap. 21. LIMUSA. México, 321-601.

Britt K W (1970) *Handbook of pulp and paper technology*. Van Nostrand Reinhold. N. Y. EUA. 723 p.

Bricker S B, Clement C G, Pirhalla D E, Orlando S P, Farrow D R G (1999) *National Estuarine Eutrophication Assessment: Effects of Nutrient Enrichment in the Nation's Estuaries*. NOAA, National Ocean Service, Special Projects Office and the National Centres for Coastal Ocean Science, Silver Spring, MD 71p.

Casey J P (1990) *Pulpa y papel, química y tecnología química*. Volumen 1. LIMUSA México.

Casey J P (1991) *Pulpa y papel, química y tecnología química*. Volumen 2. LIMUSA México, 76-100.

Casey J P (1991 b) *Pulpa y papel química y tecnología química*, Vol. 3. LIMUSA. México.

Chanakya H N, Borgaonkar S, Meena G, Jagadish K S (1993) Solidphase biogas production with garbage or water hyacinth. *Bioresour. Technol*, 46: 227–231.

Chandel A K y Singh O V (2011) Weedy lignocellulosic feedstock and microbial metabolic engineering: advancing the generation of 'Biofuel'. *Mini-Review. Appl Microbiol Biotechnol*, 89:1289–1303.

Clark, J d' A (1969) Fibrillation, free water, and fiber bonding. *Tappi*, 52(2): 335-340.

Dantas Santos N, Lopez Gomes D, Silva Costa L, Lima Cordeiro S, Santana Pereira Costa M S, Silva Trindade E, Chavichiolo Franco C R, Castanho Scortecci K, Lisboa Leite E and Oliveira Rocha H A (2012) Freshwater Plants Synthesize Sulfated Polysaccharides: Heterogalactans from Water Hyacinth (*Eichhornia crassipes*). *Int. J. Mol. Sci*, 13: 961-976.

- David N S y Shiraishi H N (1991) Wood and chemistry. New York, p. 17.
- Dharm Dutt, Upadhyaya, Malik R S, and Tyagi C H (2003) Studies on Pulp and Paper-Marking Characteristics of Some Indian Non-woody Fibrous raw Materials: Part 1. Journal of Scientific & Industrial Research, 63: 48-57.
- Doldán J, Poukka O, Salmenoja K, Battegazzore M, Fernandez V, Eluén I (2011) Evaluation of sources and routes of non-process elements in a modern eucalyptus kraft pulp mill. Artígo Técnico. O PAPEL, 72 (7): 47–52.
- Eiras K M y Colodette J L (2003) Eucalyptus kraft pulp bleaching with chlorine dioxide at high temperature. Journal Pulp and Paper Science. 29 (2): 64-69.
- Epstein P (1998) Weeds bring disease to the east African waterways. Lancet, 351-577.
- Escoto García T (1989) La expresión de unidades y su interpretación en los principales ensayos físicomecánicos practicados a papeles y cartones. Amatl, México, 3(3-4): 30-36.
- Escoto García T (2009) Manual maestro para la evaluación de pulpas a través de la curva de refinación. Primera edición. Universidad de Guadalajara, 21-81.
- Escoto García T, Rodríguez Rivas A, Contreras Quiñones H J, Díaz Ramos S G y Ochoa Ruiz H G (2013) Aprovechamiento integral de recursos forestales no maderables. Investigación y sustentabilidad. Editorial Ediciones de la Noche Universidad de Guadalajara. Guadalajara, Jalisco, México, 97-115.
- Espinoza Quiñones F R, Nivaldo Modenes A, Olivera A P, Goes trigueros D E (2013) Influence of lead-doped hydroponic medium on the adsorption/bioaccumulation processes of lead and phosphorus in roots and leaves of the aquatic macrophyte *Eichhornia crassipes*. Journal of Environmental Management, 130: 199-206.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura) (2014) “Datos y cifras globales de productos forestales 2013” Internet [<http://www.fao.org/forestry/statistics/es/>]. [Citado el 15 de mayo de 2015].
- Fengel D, Wegener G (1989) Wood chemistry, ultrastructure, reactions. Walter de Gruyter. Berlín, Germany.
- Ferreira L M, Soares, M, Egas A P and Castro J A (2003) Selective removal of chloride and potassium in kraft pulp Mills. Tappi Journal, 2(4): 21-25
- Fileto Pérez H A, Rutiaga Quiñones J G, Aguilar González C N, Páez B J, López J, and Rutiaga Quiñones O M (2013) Evaluation of *Eichhornia crassipes* as an alternative raw material for reducing sugars production. BioResources, 8(4): 5340-5348.

Fileto Pérez H A, Rutiaga Quiñones O M, Sysma M D, Lorne A M, Lou wentai, Pankow J F, Rutiaga Quiñones J G (2015) GC/MS Analysis of Some Extractives from *Eichhornia crassipes*. BioResources, 10(4): 7353-7360.

Giacomozzi D (2010) Manual Bioforest, celulosa, Grupo Arauco "Unidad 3: Procesos de cocción pulpeaje kraft.

Gopal B (1984) Utilization of water hyacinth as a new resource or its control: some environmental considerations. In: Thyagarajan, G. (Ed.), Proceedings of the International Conference on Water Hyacinth. UNEP, Nairobi, 1993-206.

Gopal B (1987) Water Hyacinth. Amsterdam, 1 - 471.

Gunnarsson C C & Petersen C M (2007) Water hyacinths as a resource in agriculture and energy production: A literature review. Waste Manag, 27(1): 117-129.

Gutiérrez Pulido H y De la Vara Salazar R (2004) Análisis y Diseño de Experimentos. McGrawHill Interamericana. México. 571p.

Guridi Gómez L. y García Moreno T. (2000). Estudio anatómico de la madera de aguacate (*Persea americana* Mill). Ciencia y Tecnología de la Madera Época 2, 5: 2-20.

Grace T M, Malcolm E W, Kocurek M J (1996) Alkaline Pulping (Pulp and Paper Manufacture Series, Volume 5), 23-25.

Gressel J (2008) Transgenics are imperative for biofuel crops. Plant Sci, 174: 246–263.

Henry Silva G G. and Camargo A F M (2006) Composição química de macrófitas aquáticas flutuantes utilizadas no tratamento de efluentes de aquicultura. Planta Daninha, 24 (1): 21-28.

Horn R A (1978) Morphology of pulp fiber from hardwoods and influence on paper strength. Forest Products Laboratory. Forest Service. US Department of Agriculture. 8 p.

Igartúa D y Monteoliva S (2010) Densidad Básica de fibras y crecimiento en dos procedencias de *Eucalyptus globulus* en argentina. Revista Bosque, 31(2): 150–156.

Istirokhatun T, Rokhati N, Rachmawaty R, Meriyani M, Priyanto S, Susato H (2015) Cellulose Isolation from Tropical Water Hyacinth for Membrane Preparation. Procedia Environmental Sciences, 23: 274–281.

Jahan M S, Sabina R, Rubaiyat A (2008) Alkaline Pulping and Bleaching of *Acacia auriculiformis* Grown in Bangladesh, Turk J Agric For, 32: 339-347.

Jayanthi P y Lalitha P (2013) Comparison of Conventional and Sound Assisted Methods For Extraction of *Eichhornia crassipes* (MART.) SOLMS. Asian J Pharm Clin Res, 6 (1): 143-146.

Joedodibroto R, Widyanto L S and Soerjani M (1983) Potential uses of some aquatic weeds as paper pulp. J. Aquat. Plant Manage, 21: 29-32.

Juacida P R, Rodriguez S S, Torres U M (2002) Composición química, obtención de pulpa kraft y su evaluación papelera en castaño, ciprés y encino. Nota técnica. Bosque, 23(1): 125-130.

Kumar A, Singh L K and Ghosh S (2009) Bioconversion of lignocellulosic fraction of waterhyacinth (*Eichhornia crassipes*) hemicellulose acid hydrolysate to ethanol by *Pichiastipitis*. Bioresour. Technol, 100(13): 3293-3297.

Lachenal D, De Choudens C, Monzie P (1980) Hydrogen peroxide as a delignifying agent. Tappi Journal, 63(4): 119-122.

Libby Earl C (1984) Ciencia y tecnología sobre pulpa y papel. Tomo 1: 79-113.

MacLean H and Gardner J A (1953) Heartwood extractives indigester corroion. Pulp paper Mag. Can, 54 (12): 125-130.

Macdonald R G, Franklin J N (1969) The pulping of wood. Pulp and paper manufactue. Vol. I, 34-35.

MacLeod M (2007) The top ten factores in kraft pulp yield. Paperi ja Puu – Paper and Timber, 89(4): 1-7.

Mahamadi C (2011) Water hyacinth as a biosorbent: A review. African Journal of Environmental Science and Technology, 5(13): 1137-1145.

Mahmood Q, Zheng P, Siddiqi M R, Islam E U, Azim M R y Hayat Y (2005) Anatomical studies on wáter hyacinth (*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms) under the influence of textile wastewater. Journal of Zhejiang University SCIENCE, 6B(10): 991-998.

Malik A (2007) Environmental challenge vis a vis opportunity: the case of waterhyacinth. Environ, 33: 122–138.

Mariani A. S, Torres U. M (2004) Análisis químico cuantitativo y condiciones de pulpaje kraft de colihue: Parte I. Bosque, 25(1): 117-122.

Módenes A N, Espinoza Quiñones F R, Lavarda F L, Colombo L, Borda C E, Leichtweis W A, Díaz Mora N (2013) Removal of heavy metals Cd (II), Cu (II) and Zn (II) biosorption process by using the macrophyte *Eicchornia crassipes*. Esc. Minas, Ouro Preto, 66(3): 355-362.

Nagaty A, Ibrahim S Tand Mansour O Y (1982) Alkaline pulping of *Ricinus communis* L. and paper made therefrom. Cellulose Paper LAB., Natl. Research Center; Cairo Egypt Cellulose chemistry and technology. El Cairo, Egipto. 523-531.

Nguyen T H T, Boetsa P, Locka K, Damanik Ambarita M N, Eurie Forioa M A, Sashaa P, Dominguez Granda L E, Thi Hoangd T H, Everaerta G, GoethalsP L M (2015) Habitat suitability of the invasive water hyacinth and its relation to water quality and macroinvertebrate diversity in a tropical reservoir, *Limnologica*, 52: 67–74.

Nolan W J, y Kirmse D W (1974) The papermaking properties of water hyacinth. *J. Aquat. Plant Manae*, 90-97.

Paper mart (2009), Black liquor properties and impact on recovery. PAPER MART, A Bi-monthly Magazine for Pulp, Paper & Converting Industries in India. [Internet]. Disponible en <https://http://papermart.in/2009/03/04/black-liquor-properties-and-impact-on-recovery-island%20-operation> [Visitada el 06 de Junio de 2016].

Patakas A, Nikolaou N, Zioziou E, Radoglou K, and Noitsakis B (2002) The role of organic solute and ion accumulation in osmotic adjustment in drought-stressed grapevines. *Plant Sci*, 163: 361–367.

Paz P, Solís J A, Ruiz C O H. y Torres U M (2011) Pulpas químicas a partir de madera de eucalipto. Proceso a la soda fría. <http://www.celso-foelkel.com.br/artigos/outros/Arquivo%2024Pulpas%20semiqu%EDmicas%20a%20partir%20de%20madera%20de%20eucalip.pdf> (24 de Abril de 2016).

Patel V, Desai M, Madamwar D, (1993) Thermochemical pretreatment of water hyacinth for improved biomethanation. *Appl. Biochem. Biotechnol*, 42: 67–74.

Parolin P, Rudolph B, Bartel S, Bresch C, Poncet C (2012) Worldwide invasion pathways of the South American *Eichhornia crassipes* In: XXVIII International Horticultural Congress on Science and Horticulture for People (Ihc2010): International Symposium on Advances in Ornamentals, Landscape and Urban Horticulture, Vol. 937: 1133–1140.

Petroff G. y Normand D. (1968) The Correlation Between Physical and Mechanical Properties of Paper, and dimensional characteristics of paper, from tropical hardwood. *Pulp and development in Africa and Near East*. FAO, 1:269-287.

Poblete H, Rodríguez S, Zárata M (1991) Wood extractives, characteristics and effects of its use as raw material. (Extraíbles de la madera, sus características y efectos sobre la utilización de esta materia prima). Publicación docente No. 34. Faculty of Forestry (Facultad de Ciencias Forestales). Austral University of Chile (Universidad Austral de Chile). Valdivia, Chile.

Poddar K, Mandal L, Banerjee G C (1991) Studies on water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) – Chemical composition of the plant and water from different habitats. Indian Veterin. J, 68: 833–837.

Porres C., Valladares L. (1979). Producción de Pulpa y Papel con Materia Prima autóctonas centroamericanas, Instituto Centroamericano de Investigación y Tecnología Industrial. Guatemala. 72p.

Prado Martínez M, Hernández J A, Becerra Aguilar B, Palacios Juárez H, Vargas Radillo J J y Rentería Urquiza M (2012) Caracterización de hojas de mazorca de maíz y de bagazo de caña para la elaboración de una pulpa celulósica mixta. Madera y Bosques, 18(3): 37-51.

Rabelo M S, Morgado A F and Mangolini Neves J (2001) The influence of enhancement of Non-process elements (NPEs) on a totally chlorine free (TCF) bleaching plant with filtrates mill closure system. 7th Brazilian Symposium on the chemistry of lignins and other wood components, poster presentation. Belo Horizonte, MG, Brazil.

Rapson W H (1963) The bleaching of pulp. Tappi monograph series No. 27. New York, 245-296.

Reales Alfaro J G, Trujillo Daza L T, Arzuaga Lindado G, Castaño Peláez H I, and Polo Córdoba A D (2013) Acid hydrolysis of water hyacinth to obtain fermentable sugars. Ciencia, Tecnología y Futuro. 5(2): 101-112.

Robinson J V (1991) Unión de las fibras. In: James P. Casey. Pulpa y papel: química y tecnología química. LIMUSA. México. vol. II, cap. 7: 137-195.

Rodríguez Jiménez J (1970) Los controles en la fabricación de papel. Blume, Madrid, España, 359p.

Rodríguez L F (2006) Can invasive species facilitate native species? Evidence of how, when, and why these impacts occur, Biol. Invasions, 8: 927–939.

Runkel R O H and Wilke K D (1951) Zur Kenntnis des thermoplastischen Verhaltens von Holz. Holz Roh Werkstoff, 9: 260-270p.

Rutiaga Quiñones J G, Rivera Prado J J, Sanjuán Dueñas R (1998) Evaluación físicomecánica de la pulpa kraft blanqueada de la madera de *Pinus douglasiana* Martínez. Ciencia forestal en México, 23(83): 17-31.

Sánchez Blanco J y Guevara Féfer (2013) Plantas Arvenses Asociadas a Cultivos de Maíz de Temporal en Suelos Salinos de la Ribera del Lago de Cuitzeo, Michoacán, México. Acta Botánica Mexicana, 105: 107-129.

Sanjuán Dueñas R (s/f) Guía práctica para la especialidad en celulosa y papel. Departamento de Ingeniería Química. Departamento de Madera, Celulosa y Papel. Universidad de Guadalajara. Guadalajara, México.

Sandermann W and Rothkamm M. (1959). Über die Bedeutung der pH-Werte von Handelshölzern und deren Bedeutung für die Praxis. Holz Roh- Werkst, 17: 433-440.

SCAN-C15:62 (Scandinavian Pulp, Paper and Board) (1962) Viscosity of cellulose in cupriethylenediamine solution (CED), 1-5.

Shakhes J, Farhad Z, Morteza M, and Tayebe S (2011) The effects of Processing Variables on the Soda and Soda-AQ Pulping of Kenaf Bast Fiber. BioResources, 6(4): 4626-4639.

Sornvoraweat B and Kongkiattikajorn J (2010) Separated hydrolysis and fermentation of water hyacinth leaves for ethanol production. KKU Res J, 15(9): 794-802.

Soinii P, Jakara J, Koljonen J (1998) Effect of transition metals on oxygen delignification and peroxide bleaching. Paperi Puu, 80(20): 116-121.

Sosa A, Klvac R, Coates E, Kent T y Devlin G (2015) Improving Log Loading Efficiency for Improved Sustainable Transport within the Irish Forest and Biomass Sectors. Sustainability, (7): 3017-3030.

Sithole B and Allen L (2002) The effects of wood extractives on system closure. Tappi Journal, 105(7): 22.

Shoyakubov R Sh y Aitmetova K I (1999) Chemical composition of *Eichhornia crassipes* and *Pistia stratiotes*. Chemistry of Natural Compounds, 35(2): 227-228.

Stiers I, Crohain N, Josens G, Triest L (2011) Impact of three aquatic invasivespecies on native plants and macroinvertebrates in temperate ponds. Biol. Inva-sions, 13: 2715–2726.

Suchy M, Argyropoulos Dimitris S (2002) American Chemical Society Oxidative Delignification Chemistry. Catalysis and Activation of Oxygen and Peroxide Delignification of Chemical Pulps: A Review, TAPPI JOURNAL, 1(2): 1-18.

Sjöström, E. and Välttilä O (1978) Inhibition of carbohydrate degradation during oxygen bleaching. Part II. The catalytic activity of transition metals and the effect of magnesium and triethanolamine. Paperi ja Puu, 60: 37–43.

Swanson J W y Steber A J (1959) Fiber surface area and bonded area. Tappi, 42(12): 986-994.

TAPPI. (Professional organization dedicated to the pulp and paper industries). (2000). Tappi Test Methods. TAPPI Press. Atlanta.

- Tan S J, Supri A G, Chong K M (2015) Properties of recycled high-density polyethylene/water hyacinth fiber composites: the effect of different concentration of compatibilizer, *Polym. Bull*, 1-13.
- Tanger P, Field J. L., Jahn C. E., Defoort M. W., Leach J. E. (2013). Biomass for thermochemical conversion: targets and challenges. *Front. Plant Sci*, 4 (218): 1-20.
- Téllez S C, Ochoa Ruíz H G, San Juan Dueñas R y Rutiaga Quiñones J G (2010) Componentes químicos del duramen de *Andira inermis* (W. Wright) DC. (*Leguminosae*). *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 16(1): 87-93.
- Sooknah R D y Wilkie A C (2004) Nutrient removal by floating aquatic macrophytes cultured in anaerobically digested flushed dairy manure wastewater. *Ecological Engineering*, 22: 27-42.
- Tamarit Urias J C (1996) Determinacion de los indices de calidad de pulpa para papel de 132 maderas latifoliadas. *Madera y Bosques*, 2(2): 29-41.
- Thomas, K T (1983) Studies on the Ecology of Aquatic Weeds in Karalla, India. *Int. Conference on Water Hyacinth*. Karala, India.
- Thomson J O, Swanson J W y Wiese L E (1953) Hemicelluloses and arabogalactans as beater adhesives. *Tappi*, 36(12): 534-541.
- Tamolang F N y Wangaard F F (1961) Relationships between hardwood fiber characteristics and pulp properties. *Tappi*, 44(3): 201-216.
- Torres L F, Melo R, Colodette J L (2005) Pulpa kraft blanqueada a partir de *Pinus tecunumanii*. *Nota técnica*. *Bosque*, 26(2): 115-122.
- Tran H and Vakkilainen E K (2007) Advances in the Kraft chemical recovery process. Research program on Increasing Energy and Chemical Recovery Efficiency in the Kraft Process, NSERC and a consortium of companies.
- Ulmgren P (1987) The removal of aluminium from the recovery system of a closed kraft pulp mill. *Nordic Pulp and Research Journal*, 1: 4-9.
- Vakkilainen E K (2005) Kraft recovery boilers - Principles and practice. The Finnish Recovery Boiler Committée, Valopaino Oy, Helsinki, Finland ISBN 952-91-8603-7.
- Vázquez Gaviña Y, Guridi Gómez L I, Rutiaga Quiñones J G (2010) Posibilidades de uso de 98 maderas para el proceso de pulpeo kraft, con base a sus indices de calidad de la pulpa. *Ciencia Nicolaita*, (52): 87-102.

- Ververis C, Georghiou K, Christodoulakis N, Santas P, y Santas R (2004) Fiber dimensions, lignin and cellulose content of various plant materials and their suitability for paper production. *Industrial Crops and Products*, 19: 245–254.
- Villamagna A M y Murphy B R (2010) Ecological and socio-economic impacts of invasive water hyacinth (*Eichhornia crassipes*): a review. *Freshw. Biol*, 55: 282–298.
- Wangaard F F (1962) Contributions of hardwoods fibers to the properties of kraft pulps. *Tappi*, 45(7): 548-556.
- Wan Rosli W D, Mazlan I y Law K. N (2009) Effects of kraft pulping variables on pulp and paper properties of *Acacia mangium* kraft pulp. *Cellulose Chem. Technol*, 43 (1-3): 9-15.
- Widyanto L S, Sopannata A, y Usman S F (1983) Waterhyacinth as a potential plant in a paper factory. *J. Aquat. Plant Manage*, (21): 32-35.
- Wise L E, M Murphy and A A D'Addieco (1946) Chlorite holocellulose, its fractionation and bearing on summative wood analysis and on studies on the hemicelluloses. *Pap. Trade J*, 122 (3): 35-43.
- Young J H (1991) Preparación de la fibra y flujo de alimentación de pasta. In: James P. Casey. *Pulpa y papel química y tecnología química*. LIMUSA. México. vol. II, cap. 6, 25-136.
- Zobel, B. y J. Talbert. (1984). *Applied Forest Tree Improvement*. John Wiley & Sons. New York.