

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y  
AGROINDUSTRIA**

**EFFECTO DEL PROCESO DE PULPAJE EN LAS PROPIEDADES  
DEL PAPEL ELABORADO A PARTIR DE PULPA DE PAJA  
TOQUILLA (*Carludovica Palmata*)**

**EFFECTO DEL PROCESO DE PULPAJE EN LAS PROPIEDADES  
DEL PAPEL ELABORADO A PARTIR DE FIBRAS NO  
MADERABLES**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO  
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO  
AGROINDUSTRIAL**

**RAMIRO JAVIER BRITO SEVILLA**

ramiro.brito@epn.edu.ec

**DIRECTORA: ING. NEYDA FERNANDA ESPÍN FÉLIX**

neyda.espin@epn.edu.ec

**DMQ, marzo 2022**

## **CERTIFICACIONES**

Yo, Ramiro Javier Brito Sevilla declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

---

Ramiro Javier Brito Sevilla

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Ramiro Javier Brito Sevilla, bajo mi supervisión.

---

Ing. Neyda Fernanda Espín Félix

**DIRECTORA**

## **DECLARACIÓN DE AUTORÍA**

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

Ramiro Javier Brito Sevilla

Ing. Neyda Fernanda Espín Félix

Ing. Omar Fernando Bonilla Hidalgo

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo con mucho amor y dedicación a mi familia: a mis padres Consuelo Sevilla y Ramiro Brito, a mi hermana Dayanna Brito y a mi perrito Bailey, por ser mi motivo de superación diaria. A mis abuelitos María Caicedo, Wilma Potero, Pedro Brito (+) y Felipe Sevilla, por cultivar en mí desde niño valores y principios que me sirvieron a lo largo de mi carrera para forjarme como persona y estudiante. A mis tíos Alexandra Brito, Patricio Brito (+) y Santiago Sevilla por apoyarme y darme el aliento necesario cuando dudaba de mis aptitudes.

Reconociendo su amor y esfuerzo, procuraré ser el mejor en lo que me proponga.

*“He fallado una y otra vez en mi vida, por eso he conocido el éxito.*

*Michael Jordan”.*

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios, por ser quien me da fuerzas en los momentos de tristeza y debilidad, por forjar mi carácter y darme la sabiduría necesaria para tomar siempre las decisiones correctas.

A mis padres Consuelo y Pedro, por su amor incondicional a pesar de las dificultades que les he ocasionado, por los consejos y la confianza que me brindaron en todo este arduo camino

A mi hermana Dayanna, por su cariño y esfuerzo diario para inculcar en mi la perseverancia, coraje y determinación que debe tener una persona para enfrentar cualquier inconveniente en el diario vivir.

A mis abuelitos maternos María y Felipe, por su amor incondicional y por enseñarme a superar las dificultades con amor, trabajo duro y constancia.

A mi abuelita paterna Wilma, por ser mi segunda madre, criarme con amor y ser mi apoyo en momentos de incertidumbre emocional.

A la memoria de mi abuelito Pedro y mi tío Patricio, por su cuidado y protección en sus días, y enseñarme el valor del trabajo constante.

A mis tíos Alexandra y Santiago, por direccionarme cuando mi vida no tenía un rumbo fijo.

A mi directora de tesis, Ing. Neyda Espín y mi codirector, Ing. Omar Bonilla, por la dirección y apoyo a lo largo de la realización de este trabajo. Por los consejos brindados a lo largo de mi carrera para ser una mejor persona y profesional.

Al personal docente de la Facultad de Ingeniería Química y Agroindustria de la Escuela Politécnica Nacional, por su conocimientos impartidos, apoyo y disposición. Al Ing. Patricio Castillo, Ing. Jenny Ávila, Ing. Catalina Vasco, Ing.

Cristina Sotomayor, Ing. Marcelo Salvador, gracias por darme aliento y confiar en mí.

A una persona muy especial, Rhonny Zapata, por ser mi amigo incondicional y demostrarme que una amistad se puede transformar en hermandad.

A mis futuras colegas Erika Albán y Dayanara López, por ser las mujeres que forjaron en mí la responsabilidad que implica estudiar una ingeniería, por la motivación que me brindaban al pasar los semestres y los consejos en los momentos más difíciles de mi vida, por su amistad y cariño, siempre estarán en mi corazón.

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>2. METODOLOGÍA</b>	<b>2</b>
2.1. Obtención de pulpa, elaboración y caracterización del papel de Paja Toquilla	2
2.2. Ensayos complementarios de Espesor y Tracción sobre el papel de Paja Toquilla	2
2.3. Análisis de espectros FTIR y RAMAN	2
<b>3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>3</b>
3.1. Resultados previos	3
3.2. Espectrofotometría Infrarroja	4
3.3. Raman	4
3.5. Espesor	5
3.6. Tracción	6
3.7. Aplicaciones	6
<b>4. CONCLUSIONES</b>	<b>7</b>
<b>RECOMENDACIONES</b>	<b>7</b>
<b>REFERENCIAS</b>	<b>7</b>

# Efecto del Proceso de Pulpaje en las Propiedades del Papel Elaborado a Partir de Pulpa de Paja Toquilla (*Carludovica palmata*)

Brito, Javier

Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Química y Agroindustrial, Quito, Ecuador

---

**Resumen:** El uso de fibras maderables ha acaparado el mercado de la industria papelera generando un impacto ambiental significativo. Las especies no maderables ofrecen fibras con una gran variedad de propiedades, siendo una de las alternativas innovadoras que pueden utilizarse en el desarrollo de nuevos derivados de la pulpa. En el presente trabajo se realizó un estudio sobre las propiedades del papel obtenido a partir de paja toquilla para evaluar el efecto de diferentes condiciones del proceso de pulpaje a la sosa. Con base en esta premisa se empleó residuos de los pseudotallos de la paja toquilla para la obtención de la pulpa a diferentes condiciones ( $T = 160\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $170\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $t = 12\text{ min}$ ,  $32\text{ min}$ ,  $77,2\text{ min}$  y  $4\text{ \% [NaOH]}$ ,  $7\text{ \% [NaOH]}$ ). Se realizó un análisis de espectrofotometría infrarroja y espectroscopia Raman en los papeles para evaluar la concentración de celulosa y lignina. Los análisis físicos y mecánicos de los papeles comprendieron pruebas de espesor y tracción. En la espectrofotometría infrarroja se evidenció que el contenido de celulosa no presenta una modificación representativa entre tratamientos, mientras que, en la espectrofotometría Raman se observó la degradación de la lignina conforme aumentó la severidad de las condiciones de pulpaje. El mayor valor de energía de tracción absorbida (TEA)  $77,21\text{ [J/m}^2\text{]}$  e índice de tensión (TI)  $57,15\text{ [N}\cdot\text{m/g]}$  se alcanzó a  $160\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $12\text{ min}$  y  $4\text{ \% [NaOH]}$  presentando las mejores condiciones para la elaboración de papel Kraft, además que todos los tratamientos cumplieron con el índice de tensión requerido por norma para la fabricación de papel bond.

**Palabras clave:** paja toquilla, pulpaje, espectrofotometría infrarroja, espectroscopia Raman, espesor, TEA, TI.

## Effect of the Pulping Process on Properties of Paper Made with Toquilla Straw Pulp

**Abstract:** The use of wood fibers has monopolized the paper industry market, generating a significant environmental impact. Non-Wood species offer fibers with a wide variety of properties, being one of the innovative alternatives that can be used in the development of new pulp derivatives. In the present work, a study was carried out on the properties of the paper obtained from toquilla straw to evaluate the effect of different conditions of the soda pulping process. Based on this premise, toquilla straw pseudo stem residues were used to obtain the pulp at different conditions ( $T = 160\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $170\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $t = 12\text{ min}$ ,  $32\text{ min}$ ,  $77,2\text{ min}$  and  $4\text{ \% [NaOH]}$ ,  $7\text{ \% [NaOH]}$ ). Infrared spectrophotometry and Raman analysis were performed on papers to assess the concentration of cellulose and lignin. The physical and mechanical analyzes of papers included thickness and traction tests. Infrared spectrophotometry showed that the cellulose content does not present a representative modification between treatments, while Raman spectrophotometry showed lignin degradation as the severity of the pulping conditions increased. The highest value of absorbed traction energy (TEA)  $77.21\text{ [J/m}^2\text{]}$  and tension index (TI)  $57.15\text{ [N}\cdot\text{m/g]}$  was reached at  $160\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $12\text{ min}$  and  $4\text{ \% [NaOH]}$  presenting the best conditions for the manufacture of Kraft paper, in addition to all the treatments complying with the tension index required by the standard for the manufacture of bond paper.

**Keywords:** toquilla straw, pulping, infrared spectrophotometry, Raman spectroscopy, thickness, TEA, TI.

---

### 1. INTRODUCCIÓN

El impacto ambiental que genera la industria de la pulpa y el papel ha sido significativo a lo largo del siglo XX. Esta industria intensiva en recursos y capital contribuye a muchos problemas ambientales existentes, incluidos: el calentamiento global, la toxicidad humana, la ecotoxicidad, la oxidación fotoquímica, la acidificación y la generación de desechos sólidos. Debido a los factores adversos generados principalmente en la contaminación del aire, agua y el cambio climático, sumado a que la madera es la principal fuente de pulpa celulósica, es importante implementar nuevas políticas ambientales y enfocarse en la investigación para suplir la materia prima maderable por otras alternativas como las fibras de: abacá, cáñamo, paja toquilla, caña, entre otras (Söderholm, 2019).

Desde el punto de vista técnico, las especies no maderables ofrecen fibras con una gran variedad de cualidades que pueden

utilizarse en el desarrollo de nuevos derivados de la pulpa. El algodón, cáñamo y lino son las tres principales fuentes utilizadas en la producción de pulpas no maderables, sin embargo, es posible utilizar cualquier planta fibrosa como: kenaf, yute, abacá, paja toquilla. Así como residuos agrícolas: paja de trigo, maíz o arroz, bagazo, sisal; y plantas silvestres: hierbas, bambú y algas (Ahmed, et al., 2017).

Las especies no maderables en comparación con la madera generalmente presentan: menor concentración de lignina, mayor cantidad de sílice, cenizas y un contenido equivalente de celulosa. En la actualidad, el estudio de las aplicaciones de las fibras no madereras se ha orientado en la producción de textiles y papel, donde compiten con fibras sintéticas y de madera (Barba, 2002). En la industria papelera se debe considerar que las propiedades físicas y mecánicas de las hojas de papel se ven afectadas por la respuesta de la fibra a las



variables de procesamiento y por las características originales de la fibra, siendo ésta última dependiente de la ubicación geográfica y de los tipos de especies nativas (Yang, 2005).

En Ecuador, la paja toquilla (*Carludovica palmata*) es una de las fibras que posee propiedades atractivas para su utilización en la industria papelería (Ferdous, 2021). Ésta es una planta herbácea que crece fácilmente en suelos degradados y pobres, se caracteriza por poseer 44% de celulosa y menos del 20% correspondiente a la lignina. Su contenido de celulosa es similar respecto a las especies maderables que se emplean para la producción de papel (Bajpai, 2017; Tuberquia, 2007). La distribución de esta especie vegetal en territorio ecuatoriano se concentra principalmente en las provincias de Manabí, Guayas, Esmeraldas y Santa Elena, en esta última se registra el 95% de producción de paja toquilla (Rojas, et al., 2009).

Existen escasos estudios relacionados al uso de la fibra de paja toquilla en la elaboración de papel. Por lo tanto, el objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de diferentes condiciones del proceso de pulpaje a la sosa en las propiedades físicas y mecánicas del papel obtenido a partir de paja toquilla y sus posibles aplicaciones en la industria del papel.

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1. Obtención de pulpa, elaboración y caracterización del papel de Paja Toquilla

Se evaluó el efecto de la temperatura, tiempo y concentración de sosa durante el pulpaje de los residuos de pseudotallos de paja toquilla y posterior fabricación del papel formado con la pulpa resultante. Se empleó un diseño factorial 3x3x2, con dos repeticiones. Los datos experimentales de rendimiento, freeness, gramaje, porosidad, índice de formación e índice de explosión de cada tratamiento fueron obtenidos del trabajo de Guzmán (2018), y complementados en el presente trabajo con la evaluación de pruebas de espesor, tracción y determinación de lignina y celulosa por FTIR y Espectroscopia RAMAN.

Se utilizaron residuos de pseudotallos de paja toquilla (*Carludovica palmata*) en estado de maduración medio proporcionados por la finca “La Abundancia” en el cantón Puerto Quito ubicada en la provincia de Pichincha. La fibra se extrajo mediante un desfibrador mecánico. Posteriormente se sometió a un proceso de cocción por 15 min a 100 °C en una marmita, se realizó un lavado y posterior secado en una estufa por 2 días.

El proceso de pulpaje químico a la sosa se realizó con 100 g de fibra cruda en base seca con una relación (w: w) de licor blanco / fibra de 8 a 1; en un digestor a temperaturas de: 160, 170, 180 °C, tiempos de: 12, 32 y 77,2 min (con el fin de alcanzar valores de Factor H 534, 1232 y 2742) y una concentración de sosa de 4 y 7 %. La pulpa celulósica obtenida se lavó con agua por 15 min a 90 °C y se secó por 24 h a 65 °C. El rendimiento se determinó según la norma TAPPI T 227 om-99 (TAPPI, 1999).

Las hojas de papel se elaboraron de acuerdo con la norma TAPPI T 227 om-99 (TAPPI, 1999). Se humectaron 30 g de pulpa seca por 24 h. Se realizó por 4 minutos el batido de la pulpa húmeda para disgregarla según la norma TAPPI T 200 sp-2001 y se formó la hoja de papel con 2031 mL de pulpa batida, empleando una formadora manual (TAPPI, 2002).

Se evaluó porosidad, índice de explosión, gramaje e índice de formación, según las normas: ASTM D726-94 (ASTM, 2003); ASTM D645/D645M-97 (ASTM, 2002); ASTM D774/D774M-97 (ASTM, 2007); y ASTM D646-13 (ASTM, 2013); respectivamente.

Se realizó un análisis estadístico ANOVA con un 95 % de confianza para determinar la influencia de cada parámetro y sus interacciones en estas características físicas y mecánicas del papel obtenido.

### 2.2. Ensayos complementarios de Espesor y Tracción sobre el papel de Paja Toquilla

El espesor se determinó en base a la norma ASTM D645/D645M-97 (ASTM, 2002), con la ayuda de un micrómetro Testing Machines INC Modelo 549E. Se realizó la medición en 4 puntos aleatorios de cada espécimen para un total de 7 réplicas por cada tratamiento. Con estos datos se obtuvieron los promedios y desviaciones estándar para cada tratamiento de pulpaje.

Los ensayos de tracción se realizaron de acuerdo con la norma ASTM D828-16, se utilizó la máquina universal de ensayos marca INSTRON modelo 3345 (ASTM, 2017). Se ensayaron 7 réplicas por cada tratamiento de pulpaje. Se calculó la energía de tracción absorbida (TEA) y su correspondiente índice de tensión (TI).

Se realizó un análisis estadístico ANOVA con un 95 % de confianza y una comparación de medias con el método de Fisher mediante el software Statgraphics Centurion XVI.

### 2.3. Análisis de espectros FTIR y RAMAN

De cada hoja de papel se obtuvo un espectro FTIR en un rango de número de onda que oscila de 4000  $\text{cm}^{-1}$  a 500  $\text{cm}^{-1}$  con el objetivo de evaluar las vibraciones de celulosa por comparación con un espectro obtenido bibliográficamente.

Se escogieron los 8 mejores espectros obtenidos en puntos aleatorios de cada hoja de papel. A partir de estos datos se obtuvo el espectro promedio con su respectiva desviación estándar con la ayuda del Software R. El valor de cada espectro promedio se comparó con un espectro patrón de celulosa y lignina obtenido bibliográficamente.

Se realizó un análisis estadístico ANOVA con un 95 % de confianza, y una comparación de medias por el método de Fisher mediante el software Statgraphics Centurion XVI.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. Resultados previos

En la Tabla 1, se muestran los resultados de las diferentes propiedades de la pulpa y de las hojas de papel de paja toquilla, obtenidas a las diferentes condiciones de pulpaje, resumidos de la investigación de Guzmán, (2018).

**Tabla 1.** Propiedades de la pulpa y papel de Paja Toquilla (*Carludovica palmata*) obtenidos a diferentes condiciones de pulpaje.

Temperatura [°C]	Tiempo [min]	Factor H	Concentración de NaOH [%]	Rendimiento de la pulpa [%]	Freeness antes del batido [mL]	Freeness después del batido [mL]	Gramaje [g/m <sup>2</sup> ]	Porosidad [s]	Formación [Índice MK]	Índice de explosión [kPa*m <sup>2</sup> /g]
160	12,0	107	4	55% ± 1%	640 ± 56,57	320 ± 98,99	72,73 ± 3,19	11,14 ± 8,16	16,5 ± 0,28	2,82 ± 0,14
	32,0	239		52% ± 1%	657 ± 38,89	360 ± 28,28	71,32 ± 2,79	17,47 ± 10,58	19,35 ± 1,63	3,12 ± 0,01
	77,2	534		47% ± 1%	620 ± 28,28	285 ± 91,92	71,32 ± 2,79	17,82 ± 19,59	15,25 ± 0,35	2,79 ± 0,17
	12,0	107	7	47% ± 1%	625 ± 7,07	285 ± 64,63	71,04 ± 4,78	7,4 ± 1,60	18,6 ± 0,71	1,83 ± 0,07
	32,0	239		43% ± 2%	600 ± 0,0	310 ± 84,85	70,19 ± 1,20	16,68 ± 11,66	15,65 ± 1,34	2,22 ± 0,25
	77,2	534		39% ± 3%	550 ± 0,0	230 ± 84,85	71,60 ± 0,0	19,56 ± 15,91	15,7 ± 3,11	2,08 ± 0,28
170	12,0	243	4	49% ± 0%	635 ± 49,50	247,5 ± 45,96	69,91 ± 3,19	25,53 ± 11,67	17,75 ± 0,07	3,13 ± 0,33
	32,0	534		47% ± 2%	580 ± 28,28	205 ± 35,36	69,06 ± 2,79	37,82 ± 1,06	14,15 ± 2,05	3,09 ± 0,15
	77,2	1232		42% ± 4%	510 ± 14,14	167,5 ± 3,54	75,26 ± 4,39	58,85 ± 0,001	20,75 ± 3,18	2,99 ± 0,06
	12,0	243	7	42% ± 0%	620 ± 28,28	255 ± 7,07	73,57 ± 2,79	19,36 ± 0,14	15,75 ± 7,14	2,30 ± 0,08
	32,0	534		38% ± 1%	557,5 ± 3,54	270 ± 28,28	74,14 ± 1,99	22,46 ± 5,20	16,05 ± 0,49	2,10 ± 0,03
	77,2	1232		35% ± 0%	487,5 ± 10,61	130 ± 0,0	71,04 ± 2,39	68,91 ± 6,33	30,05 ± 4,03	2,12 ± 0,01
180	12,0	534	4	42% ± 1%	550 ± 0,0	212,5 ± 81,32	72,45 ± 5,18	21,75 ± 0,80	20,15 ± 3,89	2,58 ± 0,08
	32,0	1217		40% ± 0%	530 ± 28,28	210 ± 42,43	69,91 ± 1,59	30,11 ± 0,37	17,6 ± 4,10	2,44 ± 0,06
	77,2	2742		36% ± 1%	457,5 ± 3,54	157,5 ± 10,61	71,04 ± 3,99	51,26 ± 14,86	33,75 ± 1,77	2,34 ± 0,02
	12,0	534	7	38% ± 0%	507,5 ± 3,54	202,5 ± 53,03	73,57 ± 0,40	19,37 ± 2,87	16,1 ± 0,85	2,07 ± 0,0
	32,0	1217		35% ± 2%	535 ± 49,50	237,5 ± 31,82	69,34 ± 2,39	7,87 ± 0,11	21,3 ± 2,62	2,11 ± 0,36
	77,2	2742		31% ± 0%	507,5 ± 38,89	105 ± 7,07	65,12 ± 0,40	54,28 ± 0,59	32,5 ± 3,25	0,78 ± 0,08

$\bar{x} \pm s$  (n = 14)

(Guzmán, 2018)

La temperatura, tiempo y concentración de sosa en el proceso de pulpaje presentaron efectos significativos en el rendimiento de la pulpa. A medida que incrementaba el valor de la temperatura, tiempo y concentración del álcali el valor del rendimiento fue menor. Este comportamiento se explica por la hidrólisis alcalina que se produce en la celulosa debido a que, conforme aumenta la temperatura es más evidente el efecto negativo que aporta la carga de sosa sobre la celulosa y hemicelulosa. Además, la ausencia de la hemicelulosa producto de esta degradación al trabajar a altas temperaturas incide en el incremento de la porosidad de la fibra, lo que favorece la absorción de la sosa en la pulpa y provoca una mayor degradación (Mussatto, et al., 2006). El mayor rendimiento se obtuvo a menor temperatura, tiempo y alcalinidad (160 °C, 12 min y 4 % de NaOH).

El Freeness antes y después del batido presentó valores menores conforme aumentaron las condiciones de pulpaje con excepción de la alcalinidad que no presentó un efecto significativo en este parámetro. La disminución del Freeness antes y después del batido se atribuye a la ruptura de los enlaces glicosídicos en la hidrólisis alcalina durante el pulpaje, lo que ocasiona pulpas más degradadas por la generación de finos durante el tratamiento (Sridach, 2010). Los finos se generan en mayor proporción al momento de batir la pulpa provocando así fibras más cortas (Ferreira, et al., 1999). Los

tratamientos menos drásticos de temperatura tiempo y concentración del álcali (160 °C, 12 min, 4 y 7 % de NaOH) obtuvieron valores dentro del rango para la producción de pulpa según la norma TAPPI 200.

Los valores de porosidad no presentaron una orientación clara en los valores obtenidos. La explicación de este comportamiento podría atribuirse a la cantidad de fibras finas producidas por el aumento de la temperatura y el batido debido a que, al aumentar la cantidad de finos se incrementa el área superficial y en consecuencia el área del poro se reduce (Joseleau, et al., 2012).

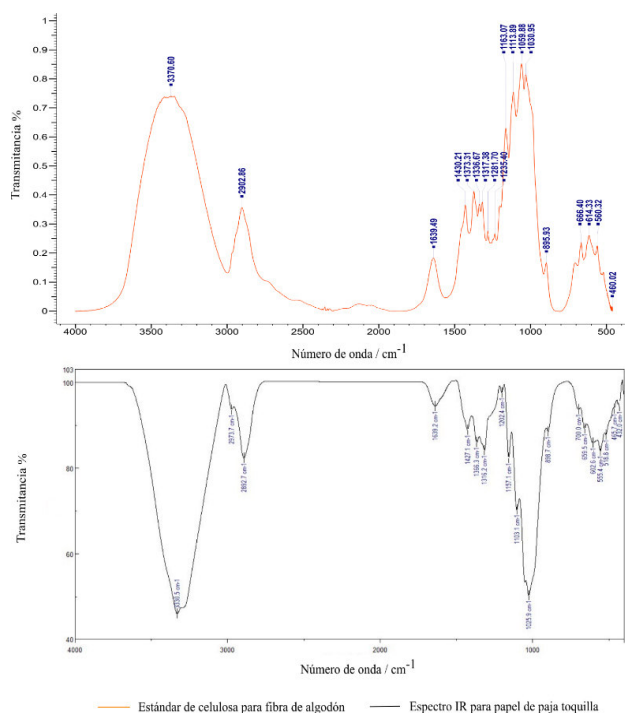
El índice de formación presentó un patrón creciente a medida que la temperatura y tiempo de operación aumentó. Este fenómeno se relaciona con la sensibilidad que presenta el índice de formación a la variación del contenido de fibras finas y cortas provocado su grado de fibrilación (Molin, et al., 2004). Por lo descrito se obtuvo un papel más uniforme a mayores condiciones de pulpaje 180 °C y 77,2 min.

El índice de explosión no se vio afectado por el tiempo, pero sí por la temperatura y la concentración de sosa debido a que el índice de explosión aumentó cuando se trabajó a 170 °C y disminuyó a 180 °C. Los valores altos de índice de explosión registrados a 160 °C y 170 °C, podrían ser generados porque

las modificaciones dadas en la fibra provocarían un incremento de las fuerzas de unión entre ellas por la fibrilación interna y externa (González, et al., 2013). El papel con mejores características de resistencia se obtuvo a 170°C y una concentración del álcali del 4%.

### 3.2. Espectrofotometría Infrarroja

En la Figura 1, se presenta la comparación de los espectros FTIR de fibra de algodón y de papel obtenido a partir de pulpa de paja toquilla a 160 °C, 12 min y 4 % de NaOH. Todos los espectros FTIR de los papeles obtenidos para cada tratamiento presentaron el mismo comportamiento.



**Figura 1.** Espectros Infrarrojos correspondientes a una muestra de celulosa para fibra de algodón y para el papel obtenido a partir de fibra de paja toquilla (*Carludovica palmata*) con pulpaje a 160 °C, 4 % de concentración de sosa y 12 minutos.

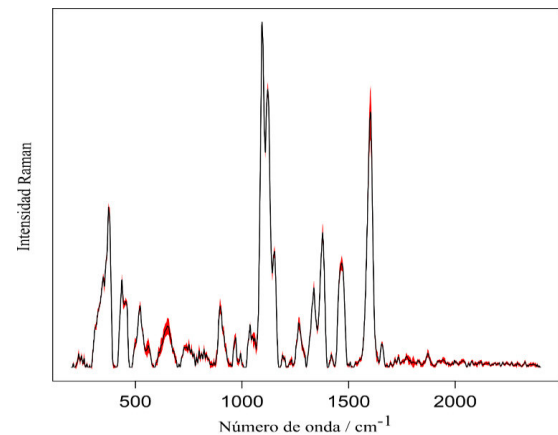
La banda a 3330,5  $\text{cm}^{-1}$  corresponde al estiramiento del grupo O–H de hidrógeno (vibraciones de celulosa). La banda se puede interpretar como el aumento en la intensidad máxima después del tratamiento con la sosa y corresponde a la gran cantidad de grupos O–H expuestos en la superficie del papel debido a la extracción de compuestos como lignina y hemicelulosa, lo que conduce a un mayor carácter hidrofílico (Li, 2020). La vibración del estiramiento C–H está representada por la banda a 2900  $\text{cm}^{-1}$ , mientras que la banda en 897  $\text{cm}^{-1}$  corresponde al grupo amina primaria N–H y al grupo  $\text{CH}_2$ . La banda alrededor de 1030  $\text{cm}^{-1}$  corresponde al estiramiento C–O de la hemicelulosa y la lignina (Nampitch, 2021).

En los espectros infrarrojos del papel de paja toquilla se observó que en todos los tratamientos las bandas de celulosa son similares a la muestra de la fibra de algodón. Esto indica la presencia de celulosa sin evidenciar una modificación

representativa entre tratamientos, lo que indicaría que todos los tratamientos eliminan las mismas sustancias contaminantes y el papel contiene principalmente celulosa.

### 3.3. Raman

En la Figura 2, se observa el espectro Raman (línea negra) del tratamiento a 160 °C, 12 min y 4% de concentración de sosa, con su media y desviación estándar (línea roja).



**Figura 2.** Espectro Raman correspondiente al papel obtenido a partir de fibra de paja toquilla (*Carludovica palmata*) con pulpaje a 160 °C, 12 min y 4% de concentración de sosa.

En los materiales provenientes de especies vegetales los principales componentes que contribuyen al espectro Raman son: celulosa, hemicelulosas, pectinas y lignina. La hemicelulosa y la lignina son amorfas, mientras que la celulosa es semicristalina, con grados de cristalinidad que alcanzan niveles de hasta el 65% (Rowell, et al., 2013).

Dado que la celulosa y la hemicelulosa tienen enlaces químicos similares, sus espectros Raman también lo deberían ser. Por lo tanto, se puede observar que en la Figura 2, las bandas Raman de hemicelulosa pueden quedar sobrepuestas por las bandas Raman de celulosa. Por otro lado, la lignina puede observarse específicamente en 1600  $\text{cm}^{-1}$  debido a sus fuertes bandas características.

Las bandas más fuertes y representativas para la celulosa ocurren en 1094, 1120 y 1379  $\text{cm}^{-1}$  (Schrader, et al., 1999). Las dos primeras bandas se atribuyen a modos de estiramiento de grupos C–O de COH/C–O–C; mientras que, la tercera se debe a deformaciones C–H (modos de flexión) (Larkin, 2011). Estas características Raman son visibles en los espectros promedio de los papeles de paja toquilla con la banda de mayor intensidad en los 1094  $\text{cm}^{-1}$ .

La lignina es un biopolímero complejo y heterogéneo, compuesto principalmente por unidades de p-hidroxifenilo (H), guayacilo (G) y siringilo (S) (Sun et al., 2011). Si se considera que la relación S:G:H (si solo se toman en cuenta estas tres unidades) puede cambiar, así las bandas Raman de la lignina pueden aparecer en rangos específicos (Sun et al., 2011). La banda de lignina en los espectros Raman promedio de los papeles de paja toquilla se encuentra

aproximadamente en 1600 cm<sup>-1</sup> y corresponde a las interacciones de estiramiento del grupo C=C (Vargas, et al., 2019).

La Tabla 2, presenta la media y desviación estándar referentes a la intensidad de lignina y celulosa medidas en el papel de paja toquilla para cada tratamiento.

**Tabla 2.** Intensidad Raman de celulosa y lignina del papel de paja toquilla (*Carludovica palmata*) a partir de pulpa obtenida con diferentes tratamientos de pulpaje.

Temperatura [°C]	Tiempo [min]	Concentración NaOH [%]	Número de onda [cm-1]	Intensidad Raman para la Celulosa	Número de onda [cm-1]	Intensidad Raman para la Lignina
160	12,0	4	1094	0,9980 ± 0,0011 <sup>ab</sup>	1600	0,668 ± 0,060 <sup>a</sup>
160	32,0			0,9945 ± 0,0032 <sup>abc</sup>		0,592 ± 0,030 <sup>ab</sup>
160	77,2			0,9975 ± 0,0011 <sup>ab</sup>		0,276 ± 0,020 <sup>d</sup>
160	12,0	7		0,9950 ± 0,0068 <sup>abc</sup>		0,519 ± 0,050 <sup>bc</sup>
160	32,0			0,9970 ± 0,0038 <sup>ab</sup>		0,276 ± 0,050 <sup>d</sup>
160	77,2			0,9825 ± 0,0105 <sup>bc</sup>		0,098 ± 0,010 <sup>fg</sup>
170	12,0	4		0,9955 ± 0,0020 <sup>abc</sup>		0,438 ± 0,030 <sup>c</sup>
170	32,0			0,9870 ± 0,0039 <sup>abc</sup>		0,216 ± 0,020 <sup>de</sup>
170	77,2			0,9950 ± 0,0021 <sup>abc</sup>		0,08 ± 0,008 <sup>gh</sup>
170	12,0	7		0,9900 ± 0,0045 <sup>abc</sup>		0,207 ± 0,030 <sup>de</sup>
170	32,0			0,9900 ± 0,0064 <sup>abc</sup>		0,08 ± 0,010 <sup>gh</sup>
170	77,2			0,9880 ± 0,0065 <sup>abc</sup>		0,05 ± 0,008 <sup>h</sup>
180	12,0	4	0,9985 ± 0,0013 <sup>a</sup>	0,15 ± 0,010 <sup>ef</sup>		
180	32,0		0,9975 ± 0,0037 <sup>ab</sup>	0,065 ± 0,008 <sup>gh</sup>		
180	77,2		0,9965 ± 0,0014 <sup>ab</sup>	0,045 ± 0,007 <sup>gh</sup>		
180	12,0	7	0,9925 ± 0,0056 <sup>abc</sup>	0,045 ± 0,004 <sup>gh</sup>		
180	32,0		0,9925 ± 0,0098 <sup>abc</sup>	0,037 ± 0,008 <sup>gh</sup>		
180	77,2		0,9800 ± 0,0037 <sup>c</sup>	0,035 ± 0,010 <sup>gh</sup>		

$\bar{x} \pm s$  (n = 16)

El análisis estadístico indicó que el tiempo de pulpaje y la concentración del álcali fueron las condiciones más influyentes en la intensidad de la celulosa evaluada por espectrofotometría Raman (p < 0,05). Este comportamiento es el esperado debido a la degradación de la pulpa anteriormente fundamentado. Además, tanto el rendimiento del pulpaje como el Freeness antes y después del batido disminuyeron conforme se incrementaron las condiciones de tiempo, temperatura y álcali. Se puede observar que a 180 ° C, 12 min y 4 % de concentración de sosa se obtuvo la mayor intensidad de celulosa. Contrariamente a 180 ° C, 77,2 min y 7 % de concentración de sosa cuya intensidad fue menor.

El efecto de la temperatura, tiempo, concentración de sosa y sus respectivas interacciones sobre la intensidad de la lignina es mucho mayor. Por lo tanto, la degradación de la lignina sería la que predomina en el pulpaje de las fibras de paja toquilla. Los papeles de paja toquilla presentan una menor concentración de lignina si existe un aumento de la severidad de las condiciones de pulpaje. La mayor intensidad de lignina se evidenció a 160 °C, 12 min y 4 % de concentración de sosa, mientras que, a 180 °C, 77,2 min y 7 % de concentración de sosa se observó la menor intensidad de lignina.

### 3.5. Espesor

En la Tabla 3, se presentan los valores de espesor de los papeles de paja toquilla, elaborados a partir de pulpas obtenidas a las diferentes condiciones de pulpaje.

**Tabla 3.** Espesor de las hojas de papel de fibra de paja toquilla (*Carludovica palmata*), a partir de pulpas obtenidas a diferentes condiciones de pulpaje.

Temperatura [°C]	Tiempo [min]	Concentración de NaOH [%]	Espesor [mm]
160	12,0	4	0,148 ± 0,010 <sup>ab</sup>
	32,0		0,132 ± 0,006 <sup>abcde</sup>
	77,2		0,149 ± 0,009 <sup>ab</sup>
	12,0	7	0,156 ± 0,007 <sup>a</sup>
	32,0		0,127 ± 0,005 <sup>bcde</sup>
	77,2		0,143 ± 0,009 <sup>abc</sup>
170	12,0	4	0,134 ± 0,009 <sup>abcde</sup>
	32,0		0,118 ± 0,020 <sup>cde</sup>
	77,2		0,133 ± 0,007 <sup>abcde</sup>
	12,0	7	0,126 ± 0,006 <sup>bcde</sup>
	32,0		0,139 ± 0,009 <sup>abcd</sup>
	77,2		0,117 ± 0,004 <sup>cde</sup>
180	12,0	4	0,138 ± 0,008 <sup>abcd</sup>
	32,0		0,118 ± 0,008 <sup>cde</sup>
	77,2		0,119 ± 0,008 <sup>cde</sup>
	12,0	7	0,135 ± 0,008 <sup>abcde</sup>
	32,0		0,113 ± 0,006 <sup>de</sup>
	77,2		0,110 ± 0,009 <sup>e</sup>

$\bar{x} \pm s$  (n = 14)

La temperatura y tiempo tienen un efecto significativo en el espesor de las hojas ( $p < 0,05$ ). Al aumentar el valor de estos parámetros el espesor disminuye. En este sentido se obtuvo un mayor espesor a 160 °C, 12 min y 7 % de concentración de sosa mientras que el menor valor de espesor se evidenció a 180 °C, 77,2 min y 7 % de concentración de sosa. Al aumentar el tratamiento calórico se genera una pérdida de finos en la formación del papel, este comportamiento se justifica por la concentración de celulosa y la degradación que sufre la lignina al aumentar las condiciones de operación que son determinantes en el carácter físico y mecánico de los papeles fabricados a partir de fibras no maderables (Ferreira, et al., 1999).

Los valores de espesor y gramaje serán los parámetros que controlen la uniformidad en las hojas fabricadas.

### 3.6. Tracción

La Tabla 4, presenta la variación de la energía de tracción absorbida e índice de tensión en función de la temperatura, tiempo y concentración de sosa.

**Tabla 4.** Energía de tracción absorbida [ $J/m^2$ ] e Índice de Tensión TI [ $N^*m/g$ ] de los papeles de fibra de paja toquilla (*Carludovica palmata*) a partir de pulpa obtenida a diferentes condiciones de pulpaje.

T [°C]	t [min]	Concentración de NaOH [%]	TEA [ $J/m^2$ ]	TI [ $N^*m/g$ ]
160	12,0	4	$77,21 \pm 1,48^a$	$57,15 \pm 0,35^a$
	32,0		$72,76 \pm 1,83^b$	$56,86 \pm 0,32^a$
	77,2		$62,43 \pm 1,56^{cd}$	$48,04 \pm 0,26^b$
	12,0	7	$71,34 \pm 1,74^b$	$42,59 \pm 0,15^{de}$
	32,0		$58,85 \pm 1,86^d$	$41,82 \pm 0,24^c$
	77,2		$51,89 \pm 1,19^e$	$39,57 \pm 0,57^{gh}$
170	12,0	4	$64,27 \pm 1,27^c$	$56,06 \pm 0,29^a$
	32,0		$51,22 \pm 1,33^{ef}$	$44,09 \pm 0,62^{cd}$
	77,2		$45,15 \pm 1,68^{gh}$	$38,60 \pm 0,57^{gh}$
	12,0	7	$61,54 \pm 1,65^{cd}$	$38,19 \pm 0,49^{hi}$
	32,0		$46,37 \pm 1,41^{sh}$	$36,70 \pm 0,54^i$
	77,2		$42,85 \pm 0,83^{hi}$	$35,05 \pm 0,49^j$
180	12,0	4	$59,98 \pm 1,35^{cd}$	$45,22 \pm 0,87^c$
	32,0		$47,32 \pm 0,71^{fg}$	$44,04 \pm 0,62^{cd}$
	77,2		$40,61 \pm 1,55^i$	$39,96 \pm 0,51^{fg}$
	12,0	7	$51,31 \pm 1,47^{ef}$	$41,15 \pm 0,50^{ef}$
	32,0		$29,61 \pm 0,96^j$	$30,86 \pm 0,85^k$
	77,2		$9,33 \pm 1,27^k$	$24,12 \pm 0,68^l$

$\bar{x} \pm s$  ( $n = 14$ )

La resistencia a la tracción se ve afectada por varios factores, como la longitud de la fibra, la corteza y el tamaño (Alokika, 2021). La absorción de la energía de tracción cuando presenta un valor elevado indica que el material posee una mayor resistencia a la tracción. En base a estas premisas, se realizó el análisis del TEA [ $J/m^2$ ] (Absorción de la energía de tracción) y TI [ $N^*m/g$ ] (índice de tensión). Se estableció que para el TEA los parámetros significativos del proceso son:

temperatura, tiempo y concentración del álcali ( $p < 0,05$ ). El efecto de estos parámetros tiene un comportamiento inverso, es decir, si se aumenta la temperatura y concentración de NaOH la absorción de la energía de tracción disminuye, lo que se traduce en papeles con una baja resistencia a la tracción. Esto se puede explicar por el contenido de lignina en las especies maderables que oscila entre el 20 y el 40 % del peso seco de la madera. La lignina además de ser un polímero aromático complejo puede funcionar como una matriz similar a un material compuesto lo que dificulta la formación de enlaces de hidrógeno entre las fibras, restringiendo el hinchamiento de estas y volviéndolas rígidas. Es por esta razón que en el proceso de pulpaje se intenta reducir su concentración para producir papeles de alta calidad y con buenas propiedades de resistencia (Maximova, et al., 2000).

Es importante mencionar que al trabajar con una pulpa que no es de origen maderable, ésta tendrá un comportamiento diferente por el espesor que presenta su pared celular además de la concentración de celulosa y lignina que posee (Ferdous, et al., 2021). La mayor absorción de la energía de tracción se evidenció a 160 °C, 12 min y 4 % de concentración de sosa; por el contrario, el menor valor de energía de tracción absorbida se observó a 180 °C, 77,2 min y 7 % de concentración de sosa.

La temperatura, tiempo y concentración de sosa presentan un efecto significativo en el índice de tensión ( $p < 0,05$ ). Al aumentar los parámetros mencionados; disminuye el índice de tensión, manifestando un carácter inverso al relacionarlos. El mayor valor se encontró a 160 °C, 12 min y 4% de NaOH y fue de 57,15 [ $N^*m/g$ ]. En la investigación de Ferdous, et al., (2021) se observa que, a valores similares referentes a los índices de tensión en papeles provenientes de fibras no maderables y residuos vegetales, las características químicas (celulosa, hemicelulosa y lignina) que contienen estas fibras, influyen en las propiedades físicas y mecánicas deseadas del papel.

### 3.7. Aplicaciones

En la Tabla 5, se presentan las posibles aplicaciones de los papeles de paja toquilla, elaborados a partir de pulpas obtenidas a las diferentes condiciones de pulpaje.

**Tabla 5.** Posibles aplicaciones de los papeles de fibra de paja toquilla a partir de pulpa obtenida a diferentes condiciones de pulpaje.

Tratamiento	Norma INEN		Aplicación
	TI [ $N^*m/g$ ]	Nº	
T: 170 °C t: 32 min [NaOH]: 7 %	36,7	2904	Papel bond
T: 180 °C, t: 77,2 [NaOH]: 7 %	24,12	1428	Papel Kraft para embalaje de alimentos
T: 160 °C, t: 12 min [NaOH]: 6%	57,15	80	Papel Kraft para embalaje general

Todos los especímenes elaborados a las condiciones de pulpaje establecidas en la fase experimental cumplen con los requisitos

referentes al índice de tensión según la norma NTE INEN 2904 (INEN, 2015) para ser considerados hojas de papel bond.

Todos los papeles pueden ser considerados como papeles Kraft destinados al embalaje de alimentos según la norma NTE INEN 1428 (INEN, 1987); por su alto gramaje y buena resistencia a la tracción. Se podría considerar el papel obtenido a 160 °C, 12 min y 6 % de NaOH como un papel Kraft más resistente destinado al embalaje general de productos ya que su gramaje y la buena absorción de la energía tracción le permitiría asemejarse a este tipo de papeles pese a no cumplir con el índice de tensión establecido por la norma (80 N\*m/g).

#### 4. CONCLUSIONES

Las condiciones del proceso de pulpaje estudiado tienen un mayor efecto sobre la lignina; conforme aumenta la temperatura, tiempo y concentración del álcali disminuye el contenido de lignina en la pulpa y por consecuencia en el papel formado.

El espesor de los papeles obtenidos se redujo conforme aumentó el valor de la temperatura y tiempo.

La energía de tracción absorbida (TEA) disminuye en función del incremento de la severidad en las condiciones de pulpaje. El tratamiento a: 160 °C, 12 min y 4% de NaOH obtuvo el mayor valor (77,2 J/m<sup>2</sup>).

El índice de tensión (TI) disminuye al aumentar las condiciones de pulpaje, de esta manera, el mayor valor obtenido (57,15 N\*m/g) se evidenció en el tratamiento a: 160 °C, 12 min y 4% de NaOH. El contenido de lignina disminuyó conforme se incrementó la severidad en las condiciones de pulpaje.

Todos los tratamientos pueden ser utilizados para la fabricación de hojas de papel bond debido a que cumplen con el índice de tensión, según la norma INEN. Por otro lado, los papeles que presentaron valores mayores referidos al índice de tensión y gramaje podrían ser destinados como papel Kraft para embalaje de alimentos ya que cumplen con el índice de tensión requeridos por la norma INEN.

El mejor tratamiento para la elaboración de papel Kraft destinado al embalaje en general fue a 160 °C, 12 min y 4 % de NaOH

Es difícil predecir las propiedades de fabricación de papel a partir de fibras no maderables y específicamente de residuos vegetales como en el presente caso de estudio. Por lo tanto; múltiples factores que afectan la unión de la fibra dependerán de las propiedades del papel proveniente de pulpa no maderable, además de las condiciones de operación a las que fue obtenida (temperatura, tiempo y concentración de sosa).

#### RECOMENDACIONES

De acuerdo con la bibliografía consultada, la morfología de la fibra influye en las características físicas y químicas de la

pulpa obtenida. Por este motivo, se debería realizar un estudio donde se evalúe el peso, la longitud, y el comportamiento hidrofílico que presenta la fibra.

Las propiedades físicas y mecánicas del papel fabricado dependerán de la concentración de lignina y de las condiciones a las que se dé la hidrólisis alcalina del proceso de pulpaje, por esta razón se debería evaluar la posibilidad de variar estos parámetros para ampliar la gama de aplicaciones de los papeles fabricados a partir de fibras no maderables.

#### REFERENCIAS

Ahmed, S., Kazi, S., Khan, G., Sadri, R., Dahari, M., Zubir, M., Ibrahim, R. (2017). Effect of various refining processes for Kenaf Bast non-wood pulp fibers suspensions on heat transfer coefficient in circular pipe heat exchanger. *Heat and Mass Transfer*, 54(3), 875–882. doi:10.1007/s00231-017-2176-3

Alokika, Anu, Kumar, A., Kumar, V., & Singh, B. (2021). Cellulosic and hemicellulosic fractions of sugarcane bagasse: Potential, challenges and future perspective. *International Journal of Biological Macromolecules*, 169, 564–582. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2020.12.175

American Society of Testing Materials, (2017). *Standard Test Method for Tensile Properties of Paper and Paperboard Using Constant-Rate-of-Elongation Apparatus. D828-16*.

American Society of Testing Materials, (2002). *Standard Test Method for Thickness of Paper and Paperboard. D 645/D 645M – 97*.

American Society of Testing Materials, (2007). *Standard Test Method for Bursting Strength of Paper. D774/D774M – 97*.

American Society of Testing Materials, (2013). *Standard Test Method for Mass Per Unit Area of Paper and Paperboard of Aramid Papers (Basis Weight). D646-13*.

American Society of Testing Materials, (2003). *Standard Test Method for Resistance of Nonporous Paper to Passage of Air. D726-94*.

American Society of Testing Materials, (2013). *Standard Test Method for Moisture Analysis of Particulate Wood Fuels. E871-82*.

Barba, C., Montané, D., Rinaudo, M., Farriol, X. (2002). *Cellulose*, 9(3/4), 319–326. doi:10.1023/a:1021184509189

Bajpai, P. (2017). The Pulp and Paper Industry. *Pulp and paper Industry*, 9-29. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811099-7.00002-2>

Ferdous, T., Ni, Y., Quaiyyum, M., Uddin, M., Jahan, M. (2021). Non-Wood Fibers: Relationships of Fiber Properties with Pulp Properties. *ACS Omega*, 6(2), 21613–21622. doi: 10.1021/acsomega.1c02933

- Ferreira, P., Matos, S., Figueiredo, M. (1999). Size Characterization of Fibres and Fines in Hardwood Kraft Pulps, *16*, 20–24.
- González, I., Vilaseca, F., Alcalá, M., Pèlach, M., Boufi, S., Mutjé, P. (2013). Effect of the combination of biobeating and NFC on the physico-mechanical properties of paper. *Cellulose*, *20*(3), 1425–1435. <https://doi.org/10.1007/s10570-013-9927-1>
- Guzmán, M. (2018). Estudio de la Influencia de las Variables de Operación del Pulpaje a la Sosa en las Propiedades de la Pulpa Celulósica y el Papel Elaborado a Partir de Fibra de Paja Toquilla (*Carludovica Palmata Ruiz & Pav*). [Proyecto de titulación previo a la obtención de Ingeniera Agroindustrial]. Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- Hanamura, M., Sawada, T., Serizawa, T. (2021). In-Paper Self-Assembly of Cellulose Oligomers for the Preparation of All-Cellulose Functional Paper. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, *9*(16), 5684–5692. doi:10.1021/acssuschemeng.1c00815
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2015). *Papel y cartón. Papel para cuadernos. Requisitos. NTE INEN 2904*.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (1987). *Papeles Kraft forro para cajas de cartón corrugado. Requisitos. NTE INEN 2267*.
- Joseleau, J., Chevalier, V., Ruel, K. (2012). Interaction between microfibrillar cellulose fines and fibers: Influence on pulp qualities and paper sheet properties. *Cellulose*, *19*(3), 769–777. <https://doi.org/10.1007/s10570-012-9693-5>
- Larkin, P. (2011). Infrared and Raman spectroscopy: Principles and spectral interpretation. *Elsevier Inc*.
- Li, Z., Zhang, X., Fa, C., Zhang, Y., Xiong, J., Chen, H. (2020). Investigation on characteristics and properties of bagasse fibers: Performances of asphalt mixtures with bagasse fibers. *Construction and Building Materials*, *248*, 118648. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118648
- Maximova, N., Österberg, M., Koljonen, K., Stenius, P. (2001). Lignin adsorption on cellulose fiber surface: Effect on surface chemistry, surface morphology and paper strength. *Cellulose*, *8*(2), 113–125. doi:10.1023/a:1016721822763
- Molin, U., Daniel, G. (2004). Effects of refining on the fiber structure of kraft pulps as revealed by FE-SEM and TEM: Influence of alkaline degradation. *Holzforchung*, *58*(3), 226–232. <https://doi.org/10.1515/HF.2004.035>
- Mussatto, S., Dragone, G., Rocha, G., Roberto, I. (2006). Optimum operating conditions for brewer's spent gain soda pulping. *Carbohydrate Polymers*, *64* (1), 22-28. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2005.10.033>
- Nampitch, T. (2021). Mechanical, thermal and morphological properties of polylactic acid/ natural rubber/ bagasse fiber composite foams. *ELSEVIER*, *12*, 100225. <https://doi.org/10.1016/j.rinma.2021.100225>.
- Petroudy, S., Sheikhi, P., Ghobadifar, P. (2016). Sugarcane Bagasse Paper Reinforced by Cellulose Nanofiber (CNF) and Bleached Softwood Kraft (BSWK) Pulp. *Journal of Polymers and the Environment*, *25*(2), 203–213. doi:10.1007/s10924-016-0800-9
- Prinsen, P., Rencoret, J., Gutiérrez, A., Litiä, T., Tamminen, T., Colodette, J. L., Del Río, J. (2013). Modification of the Lignin Structure during Alkaline Delignification of Eucalyptus Wood by Kraft, Soda-AQ, and Soda-O2 Cooking. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, *52*(45), 15702–15712. doi:10.1021/ie401364d
- Rojas, M., Morejón, L. (2009). Proyecto de producción, comercialización y exportación de artesanías de paja toquilla en la península de Santa Elena. [Proyecto]. Escuela Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador.
- Rowell, R., Pettersen, R., Tshabalala, A. (2013). Cell wall chemistry. In R. M. Rowell (Ed.), *Handbook of wood chemistry and wood composites* (pp. 33–74). Florida: Taylor & Francis Group.
- Schrader, B., Klump, H., Schenzel, K., Schulz, H. (1999). Non-destructive NIR FT Raman analysis of plants. *Journal of Molecular Structure*, *509*, 201–212.
- Söderholm, P., Bergquist, A., Söderholm, K. (2019). Environmental Regulation in the Pulp and Paper Industry: Impacts and Challenges. *Current Forestry Reports*, *5*(4), 185–198. doi:10.1007/s40725-019-00097-0
- Sridach, W. (2010). The Environmentally Benign Pulping Process of Non-Wood Fibers. *Suranaree Journal of Science and Technology*, *17*(2), 105–123.
- Sun, L., Simmons, B. A., & Singh, S. (2011). Understanding tissue specific compositions of bioenergy feedstocks through hyperspectral Raman imaging. *Biotechnology and Bioengineering*, *108*, 286–295.
- Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (2002). *Forming hand sheets for physical test of pulp. T 205-sp-02*
- Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (1999). *Freeness pulp (Canadian standard method). T 227 om-99*
- Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (2001). *Laboratory beating of pulp (Valley beater method). T 200 sp-01*
- Tuberquia, D. (2007). Caracterización taxonómica, ecológica y etnobotánica de las especies de la familia Cyathaceae de CORANTOQUIA, 70.

Vargas , P., Ciobotă, V., Salinas, W., Kampe, B., Aponte, P., Rösch, P., Ramos, L. (2016). Distinction of Ecuadorian varieties of fermented cocoa beans using Raman spectroscopy. *Food Chemistry*, 211, 274–280. doi: 10.1016/j.foodchem.2016.05.017

Yang, L., Liu, S. (2005). Kinetic Model for Kraft Pulping Process. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 44(18), 7078–7085. doi:10.1021/ie050301n



## **FICHAS TÉCNICAS**

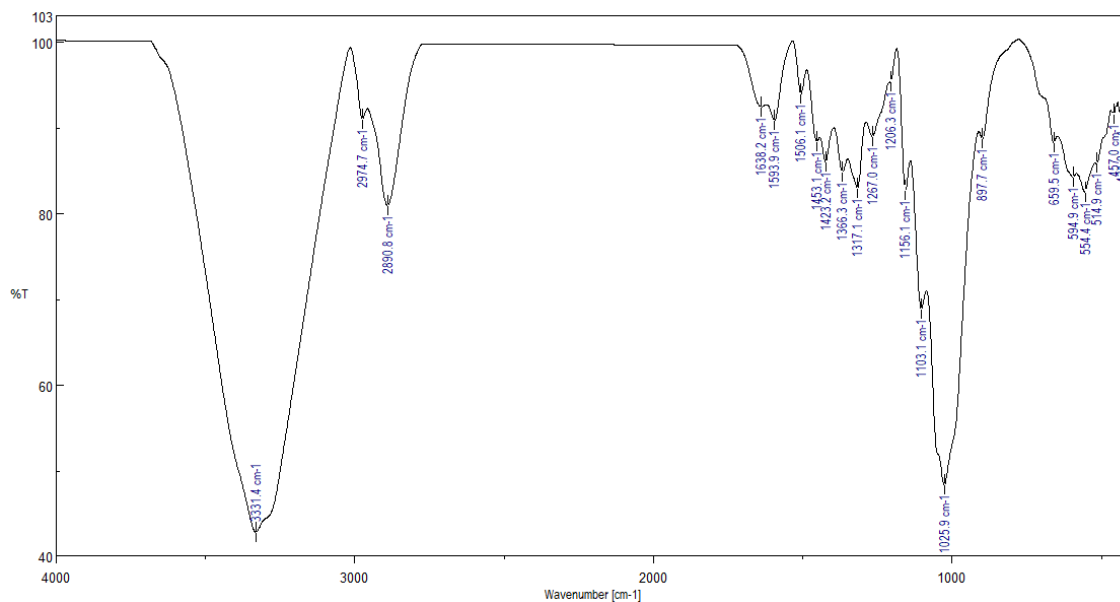
## ÍNDICE DE FICHAS TÉCNICAS

<b>FICHA TÉCNICA I</b>	<b>10</b>
ESPECTROS INFRARROJOS OBTENIDOS DEL PAPEL DE PAJA TOQUILLA ( <i>Carludovica palmata</i> )	10
<b>FICHA TÉCNICA II</b>	<b>19</b>
ESPECTROS RAMAN OBTENIDOS DEL PAPEL DE PAJA TOQUILLA ( <i>Carludovica palmata</i> )	19
<b>FICHA TÉCNICA III</b>	<b>26</b>
DETERMINACIÓN DE LA ENERGÍA DE TRACCIÓN ABSORBIDA (TEA) EN HOJAS FABRICADAS A PARTIR DE PULPA DE PAJA TOQUILLA ( <i>Carludovica palmata</i> )	26
<b>FICHA TÉCNICA IV</b>	<b>28</b>
DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE TENSIÓN (TI) EN HOJAS FABRICADAS A PARTIR DE PULPA DE PAJA TOQUILLA ( <i>Carludovica palmata</i> )	28
<b>FICHA TÉCNICA V</b>	<b>30</b>
ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA VARIANZA EN LA INTENSIDAD DE LOS ESPECTROS RAMAN DEL PAPEL DE FIBRA DE PAJA TOQUILLA ( <i>Carludovica palmata</i> )	30
<b>FICHA TÉCNICA VI</b>	<b>35</b>
ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA VARIANZA PARA EL ESPESOR DE LAS HOJAS DE PAPEL FABRICADAS A PARTIR DE LA PULPA DE PAJA TOQUILLA ( <i>Carludovica palmata</i> )	35
<b>FICHA TÉCNICA VII</b>	<b>38</b>
ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA VARIANZA DE LA ENERGÍA DE TRACCIÓN ABSORBIDA (TEA) [J/m <sup>2</sup> ] DE LAS HOJAS DE PAPEL FABRICADAS A PARTIR DE LA PULPA DE PAJA TOQUILLA ( <i>Carludovica palmata</i> )	38
<b>FICHA TÉCNICA VIII</b>	<b>41</b>
ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA VARIANZA DEL ÍNDICE DE TENSIÓN (TI) [N*m/g] DE LAS HOJAS DE PAPEL FABRICADAS A PARTIR DE PULPA DE PAJA TOQUILLA ( <i>Carludovica palmata</i> )	41

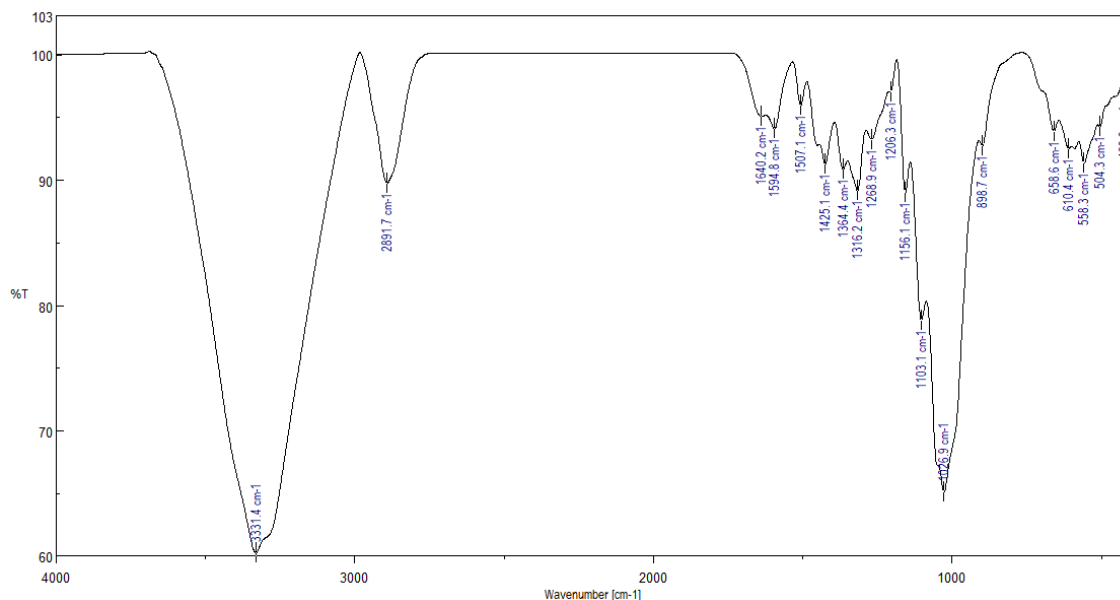
# FICHA TÉCNICA I

## ESPECTROS INFRARROJOS OBTENIDOS DEL PAPEL DE PAJA TOQUILLA (*Carludovica palmata*)

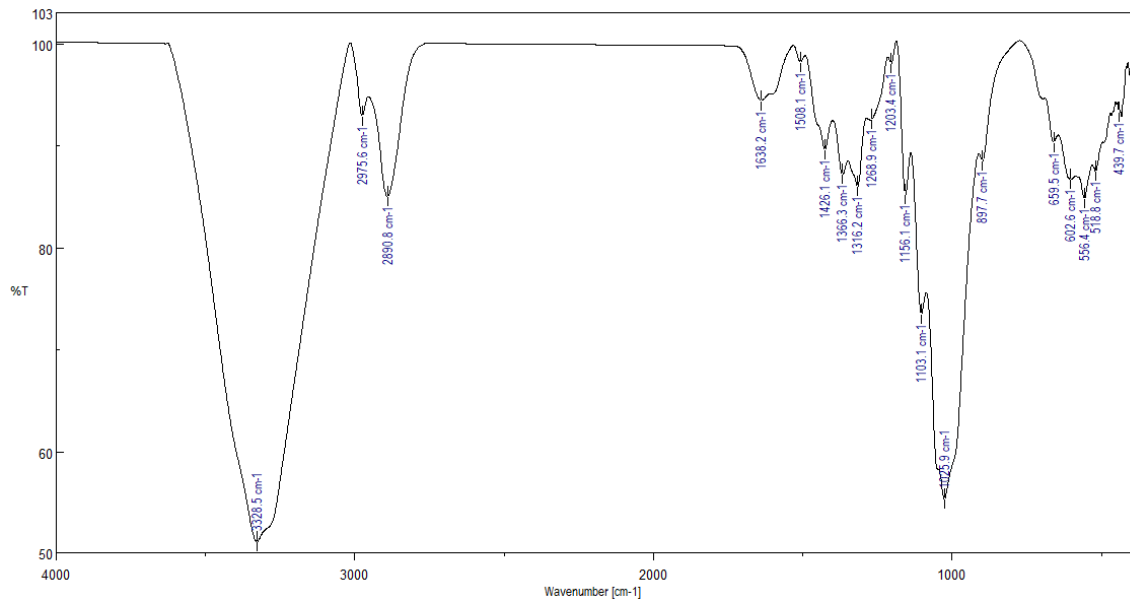
**Objetivo:** Comparar las vibraciones de celulosa de las muestras obtenidas en la fase experimental, con el estándar.



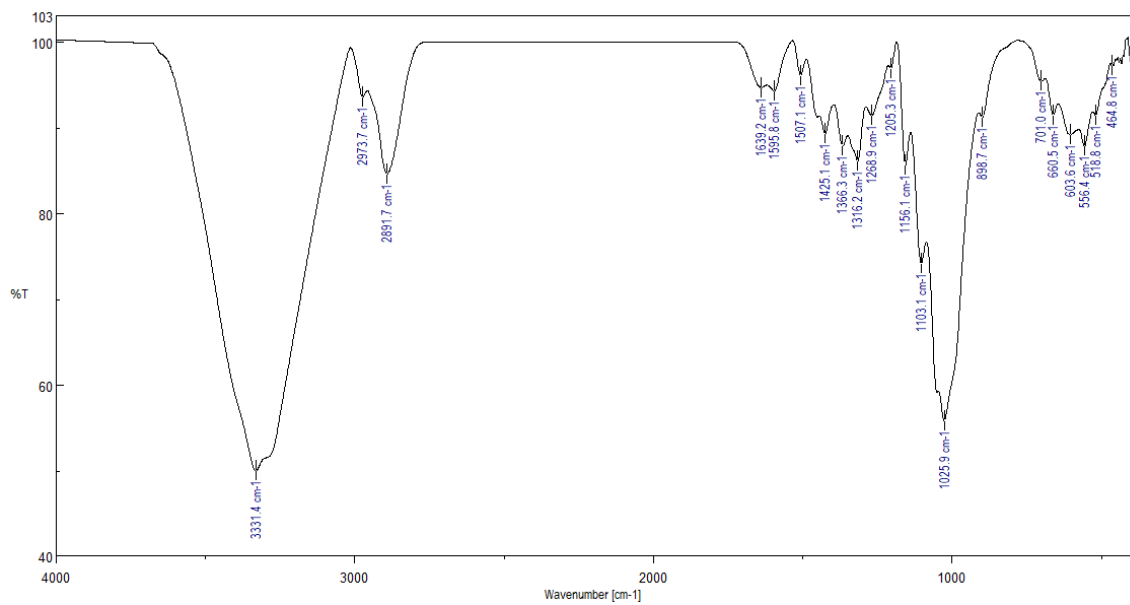
**Figura FTI.1** Espectro Infrarrojo para papel de paja toquilla (T = 160 °C, t = 12 min, H= 80,34, [NaOH]= 4%)



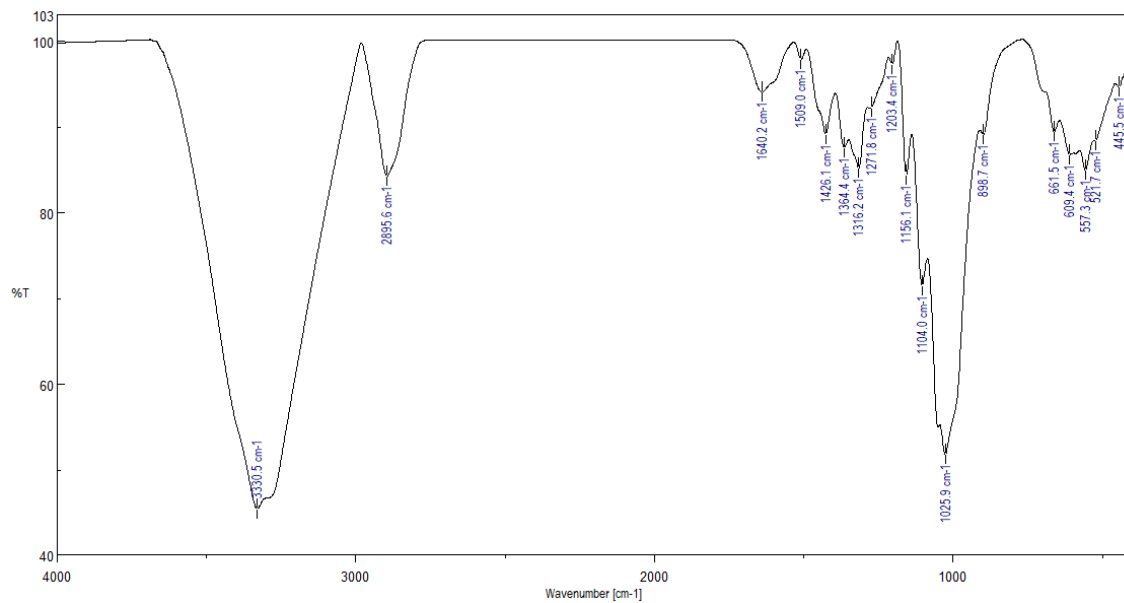
**Figura FTI.2** Espectro Infrarrojo para papel de paja toquilla (T = 160 °C, t = 32 min, [NaOH]= 4%)



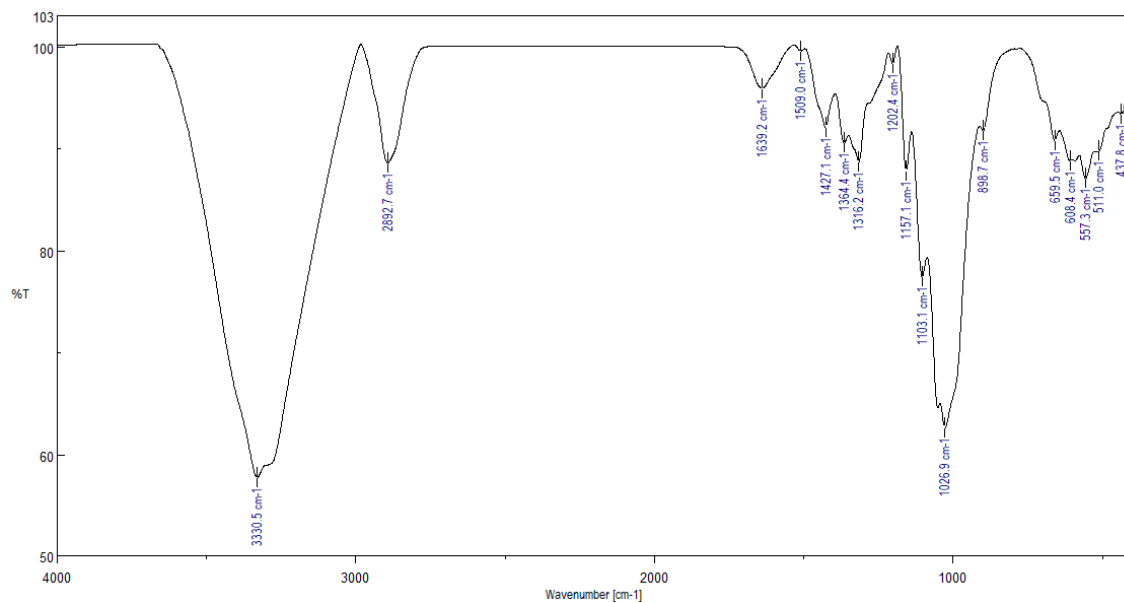
**Figura FTI.3** Espectro Infrarrojo para papel de paja toquilla (T=160 °C, t=77,24 min, [NaOH]= 4%)



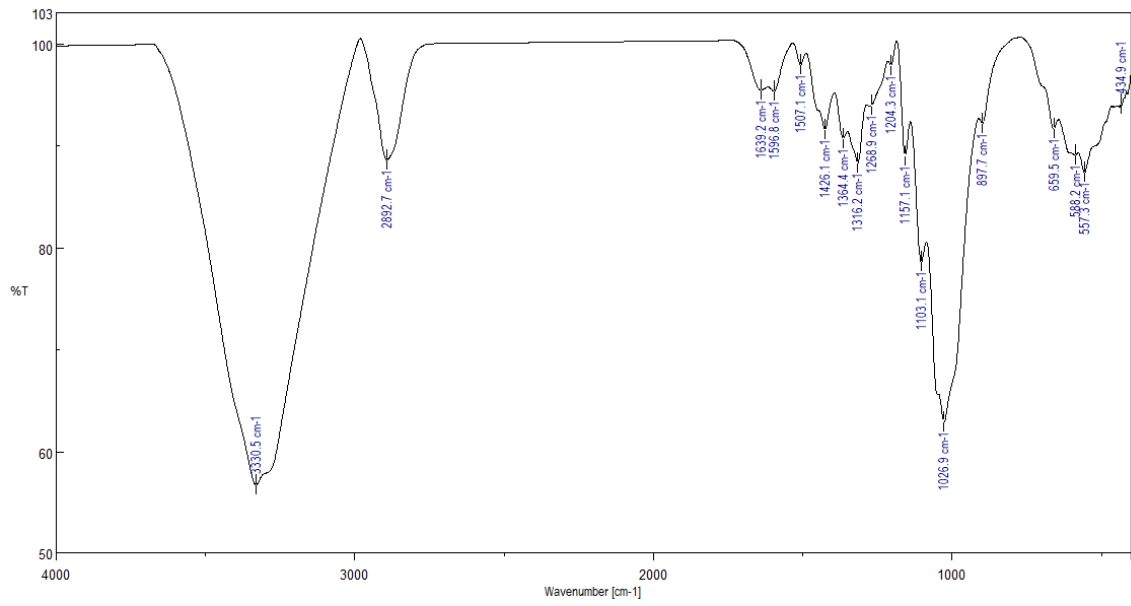
**Figura FTI.4** Espectro Infrarrojo para papel de paja toquilla (T=160 °C, t =12 min, [NaOH]= 7%)



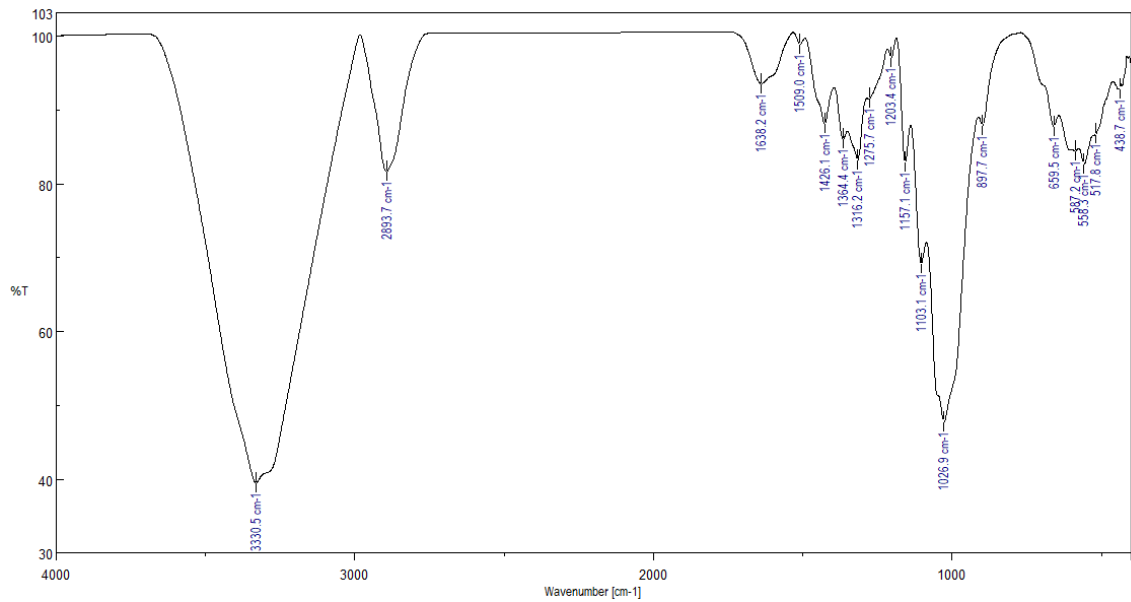
**Figura FTI.5** Espectro Infrarrojo para papel de paja toquilla (T=160 °C, t = 32 min, [NaOH]= 7%)



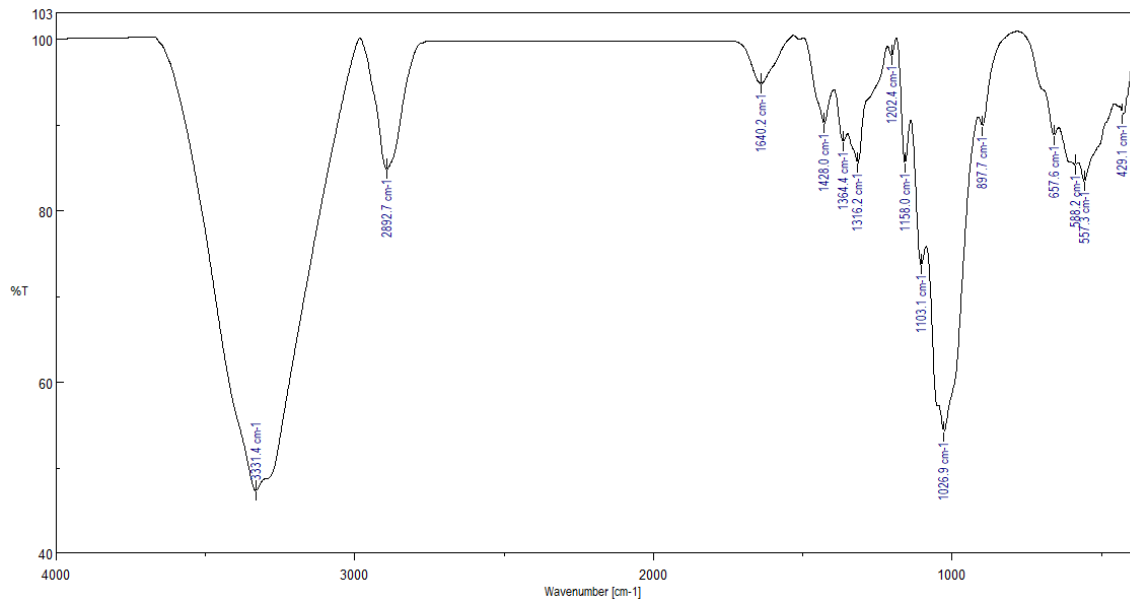
**Figura FTI.6** Espectro Infrarrojo para papel de paja toquilla (T=160 °C, t = 77,24 min, [NaOH]= 7%)



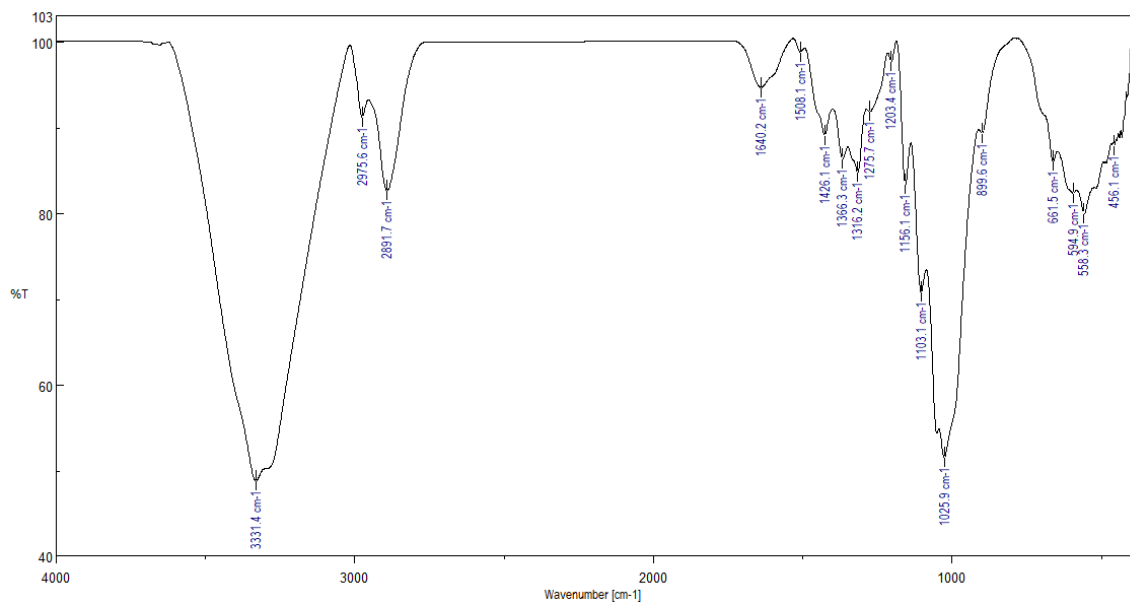
**Figura FTI.7** Espectro Infrarrojo para papel de paja toquilla (T=170 °C, t =12min, [NaOH]= 4%)



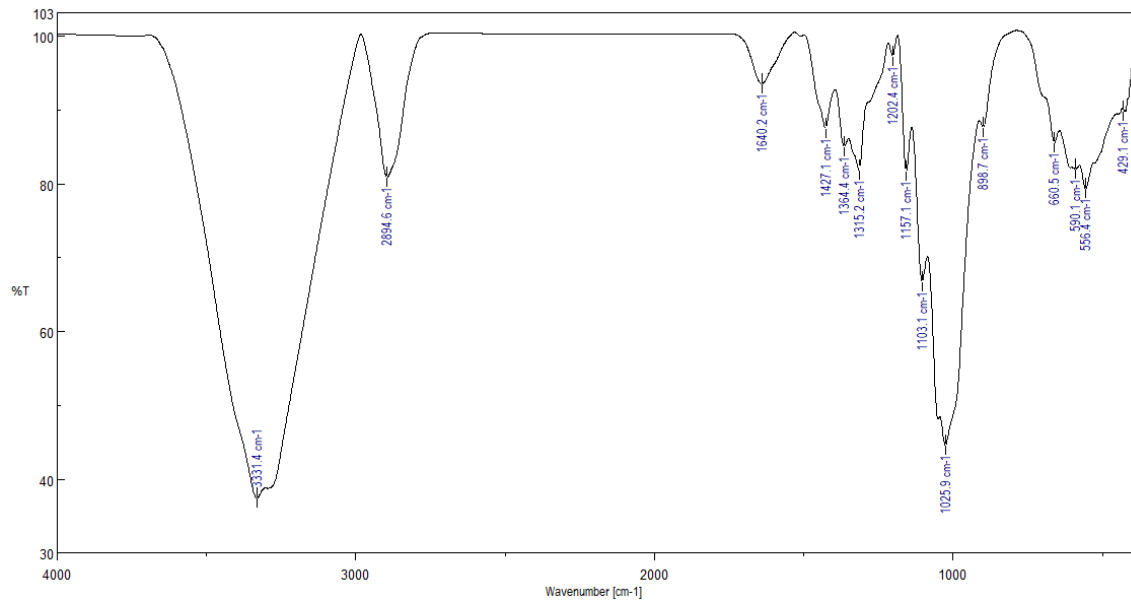
**Figura FTI.8** Espectro Infrarrojo para papel de paja toquilla (T=170 °C, t = 32 min, [NaOH]= 4%)



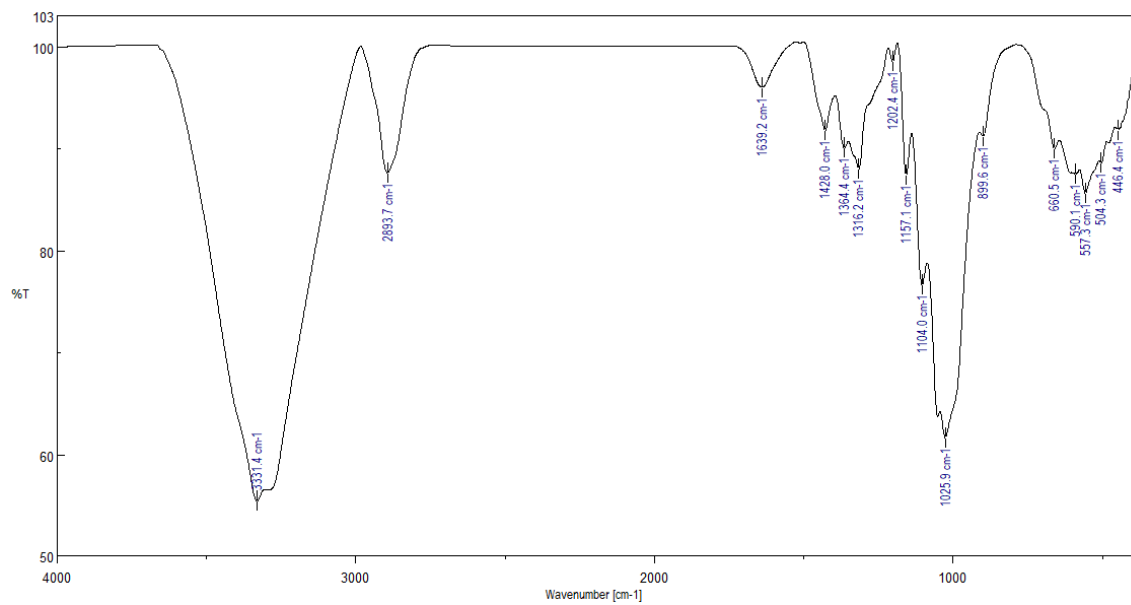
**Figura FTI.9** Espectro Infrarrojo para papel de paja toquilla ( $T = 170\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $t = 77,24\text{ min}$ ,  $[\text{NaOH}] = 4\%$ )



**Figura FTI.10** Espectro Infrarrojo para papel de paja toquilla ( $T = 170\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $t = 12\text{ min}$ ,  $[\text{NaOH}] = 7\%$ )

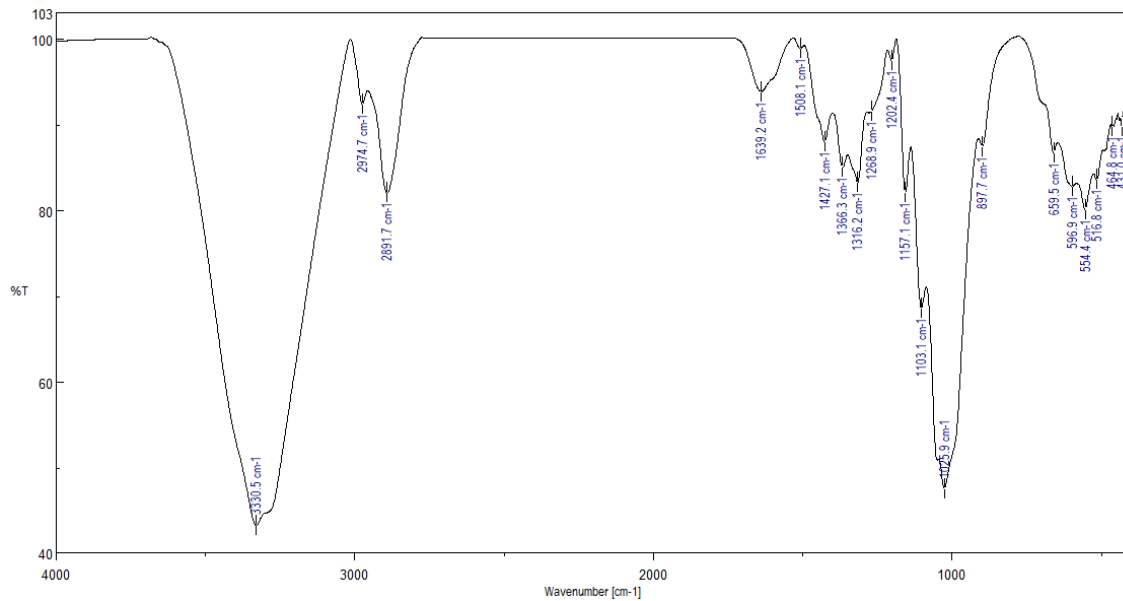


**Figura FTI.11** Espectro Infrarrojo para papel de paja toquilla (T = 170 °C, t = 32 min, [NaOH]= 7%)

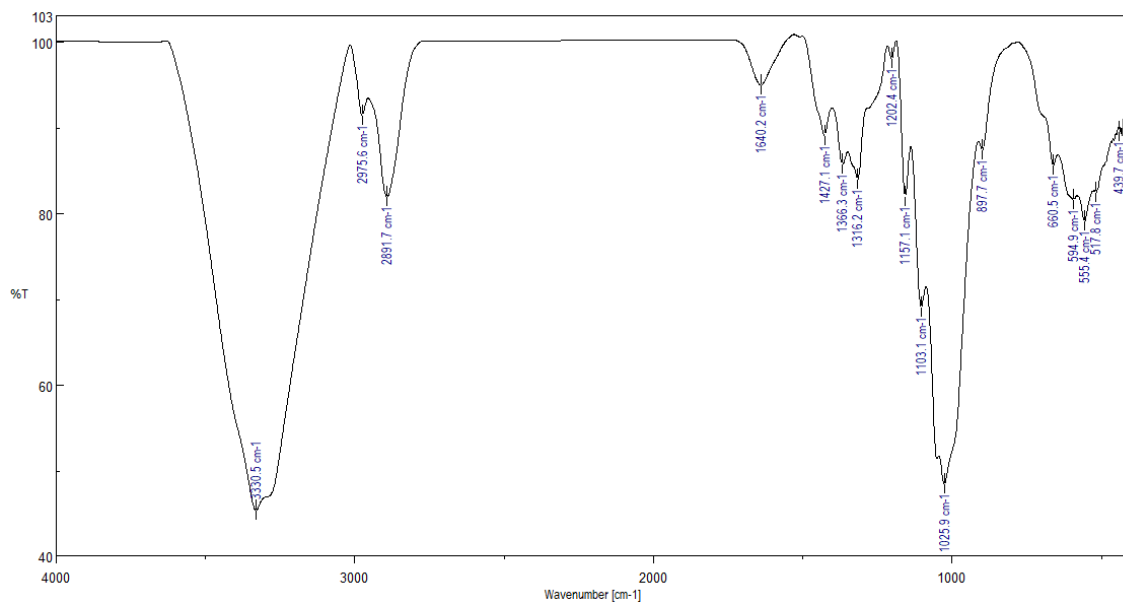


**Figura FTI.12** Espectro Infrarrojo para papel de paja toquilla (T = 170 °C, t = 77,24 min, [NaOH]= 7%)

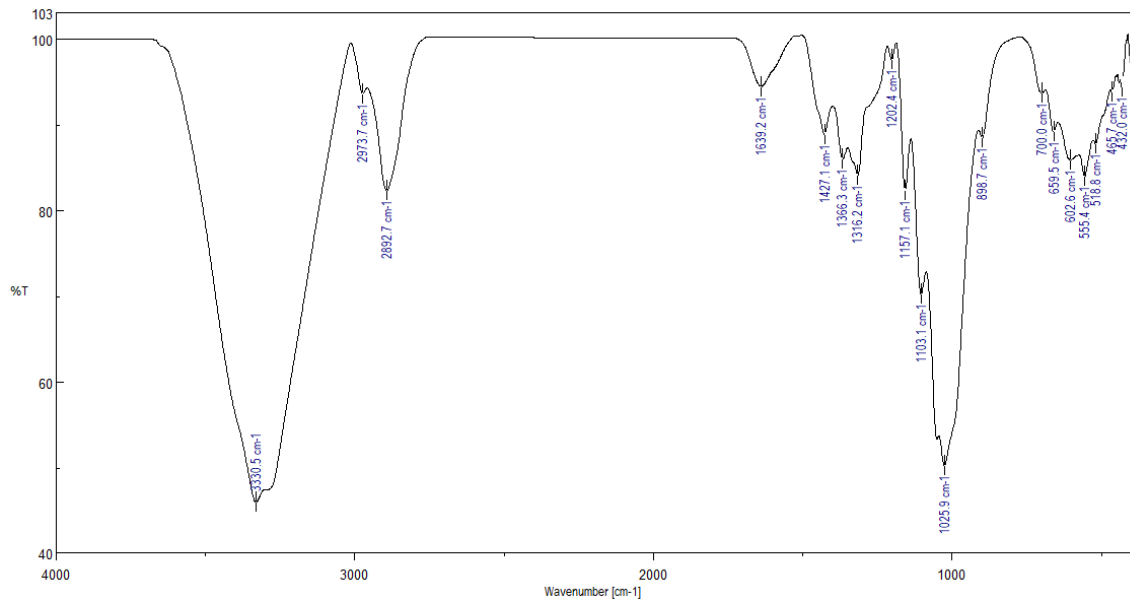




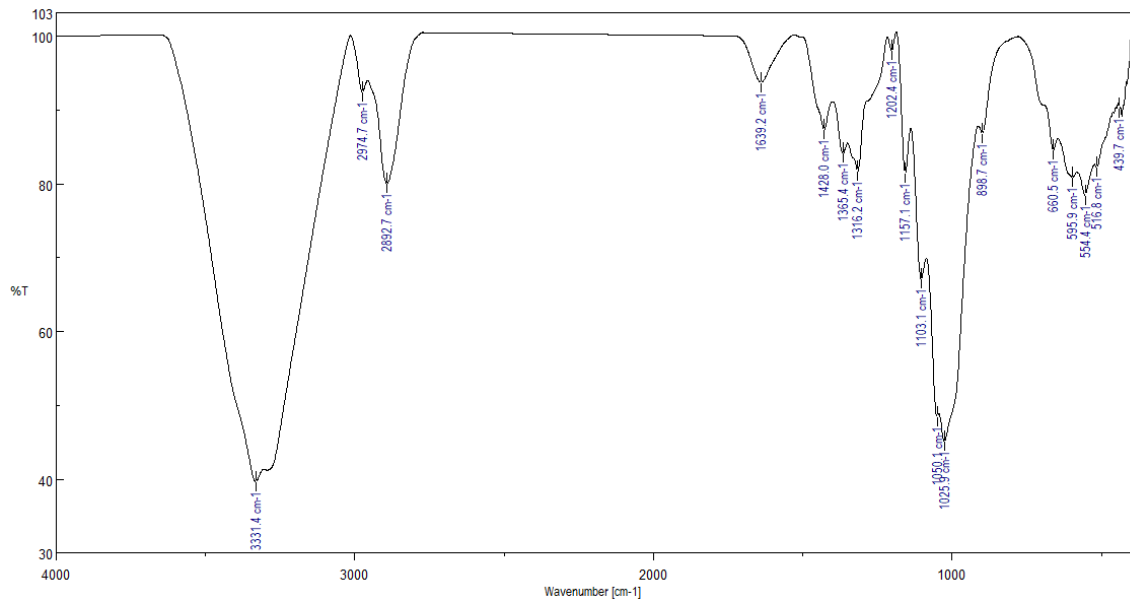
**Figura FTI.13** Espectro Infrarrojo para papel de paja toquilla (T = 180 °C , t = 12min, [NaOH]= 4%)



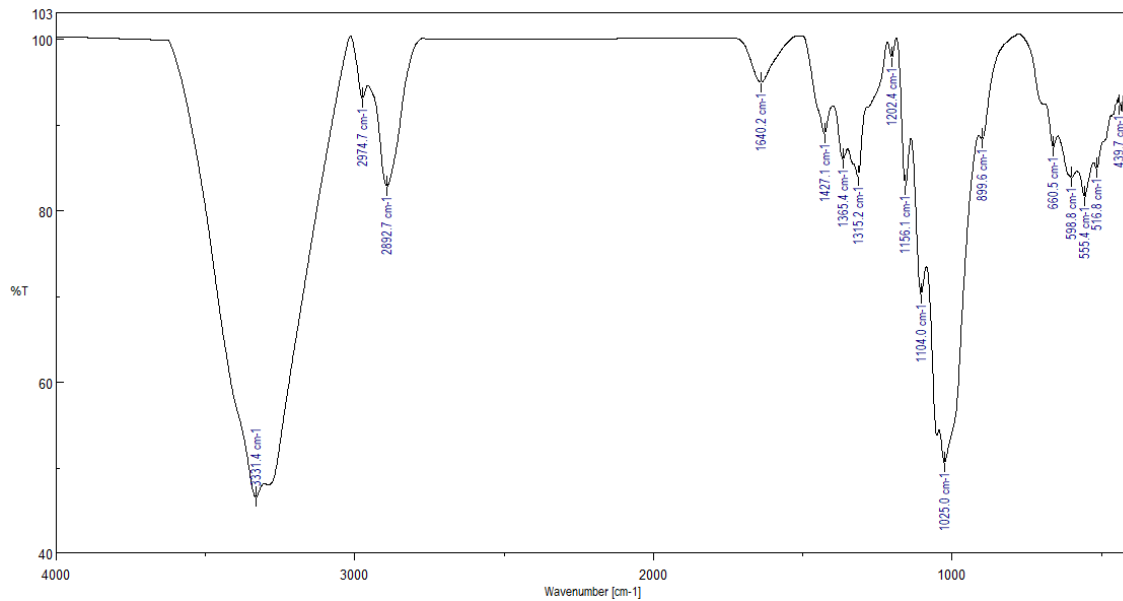
**Figura FTI.14** Espectro Infrarrojo para papel de paja toquilla (T = 180 °C, t = 32min, [NaOH]= 4%)



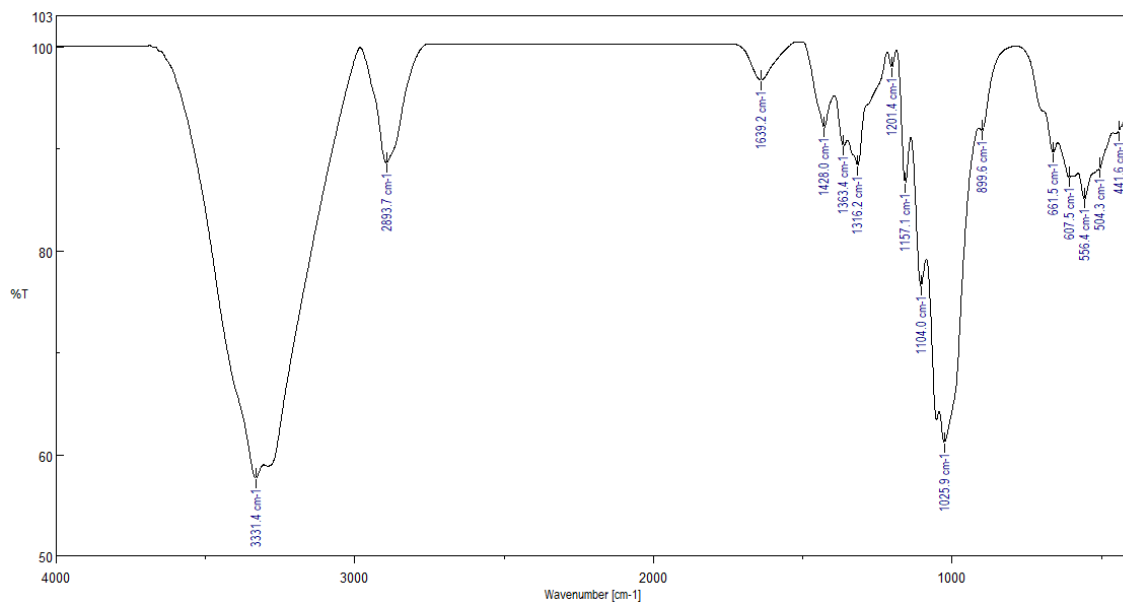
**Figura FTL.15** Espectro Infrarrojo para papel de paja toquilla (T = 180 °C, t=77,24min, [NaOH]= 4%)



**Figura FTL.16** Espectro Infrarrojo para papel de paja toquilla (T = 180 °C, t = 12min, [NaOH]= 7%)



**Figura FTI.17** Espectro Infrarrojo para papel de paja toquilla (T = 180 °C, t = 32 min, [NaOH]= 7%)

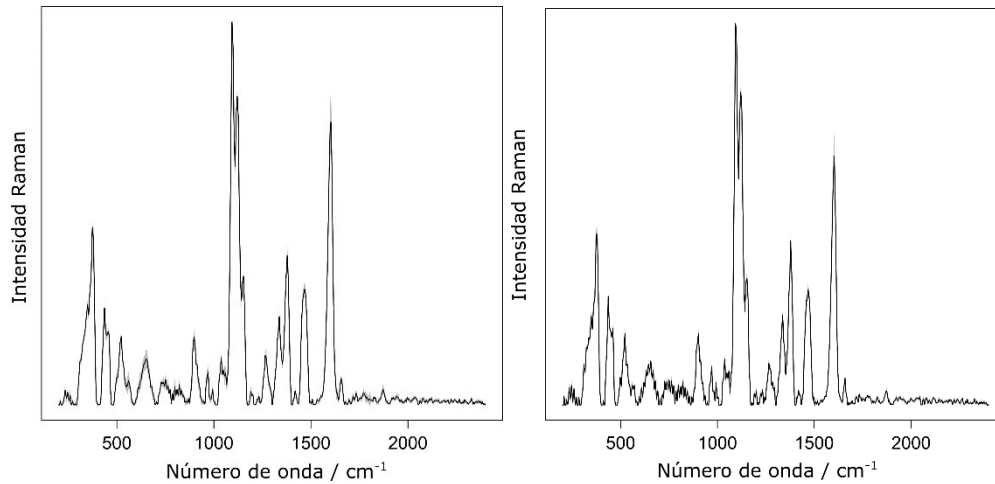


**Figura FTI.18** Espectro Infrarrojo para papel de paja toquilla (T = 180 °C, t = 77,24 min, [NaOH]= 7%)

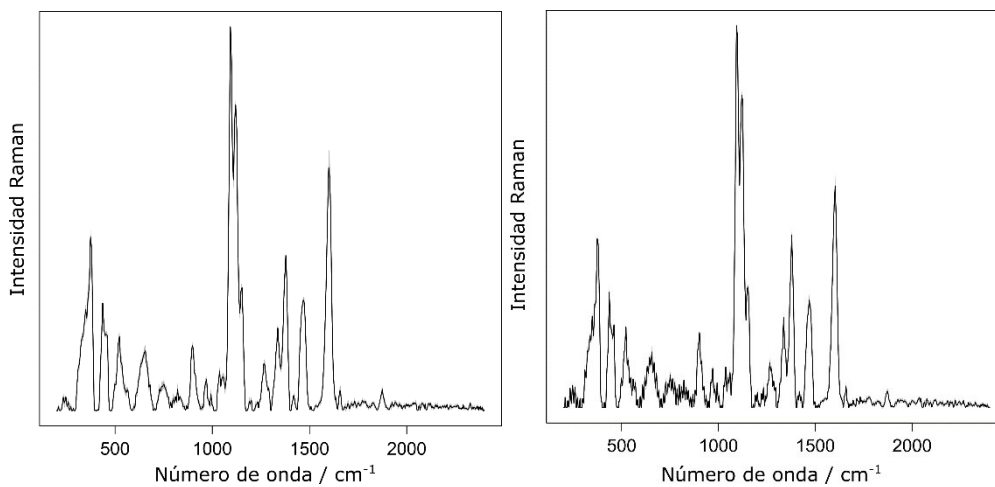
## FICHA TÉCNICA II

### ESPECTROS RAMAN OBTENIDOS DEL PAPEL DE PAJA TOQUILLA (*Carludovica palmata*)

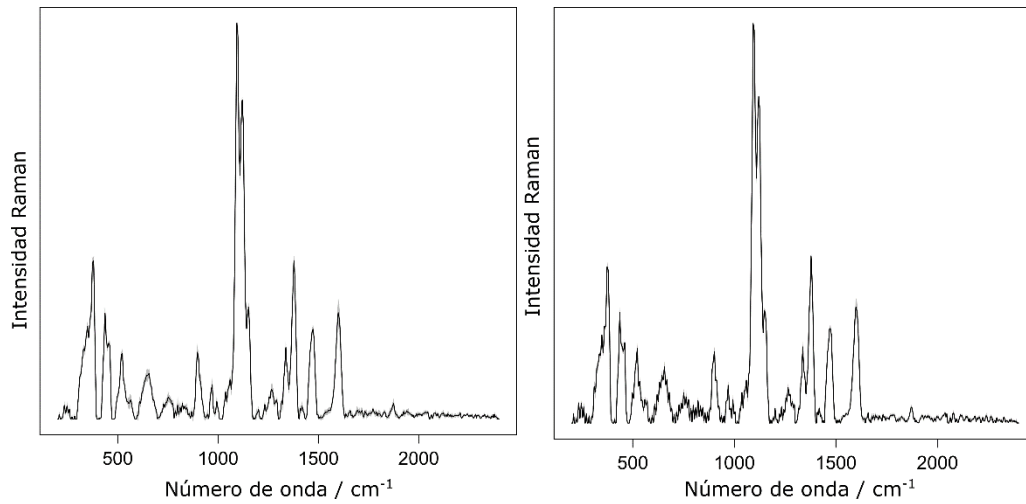
**Objetivo:** Comparar las vibraciones de celulosa y lignina de las muestras obtenidas en la fase experimental.



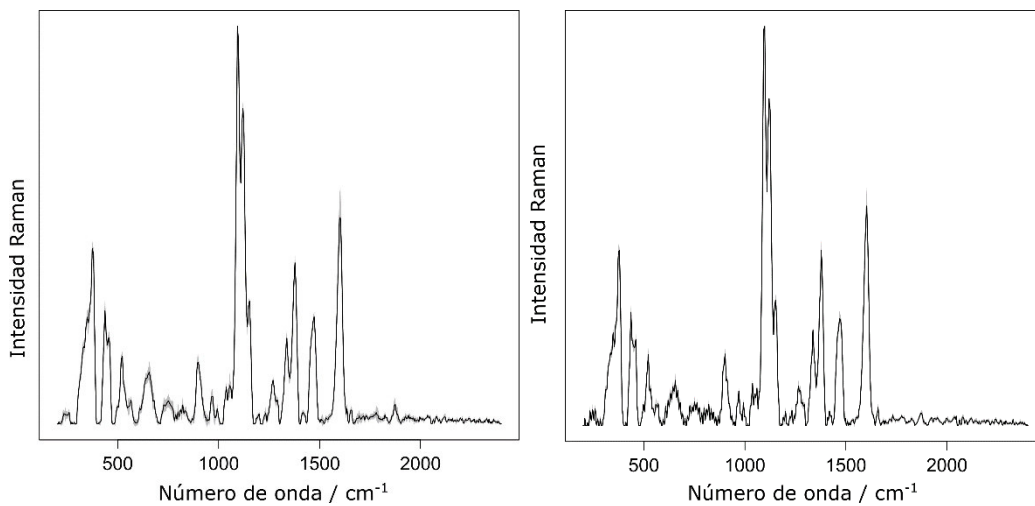
**Figura FTII.1** Espectros Raman para muestras paralelas de papel de paja toquilla (T = 160 °C, t = 12min, [NaOH]= 4%)



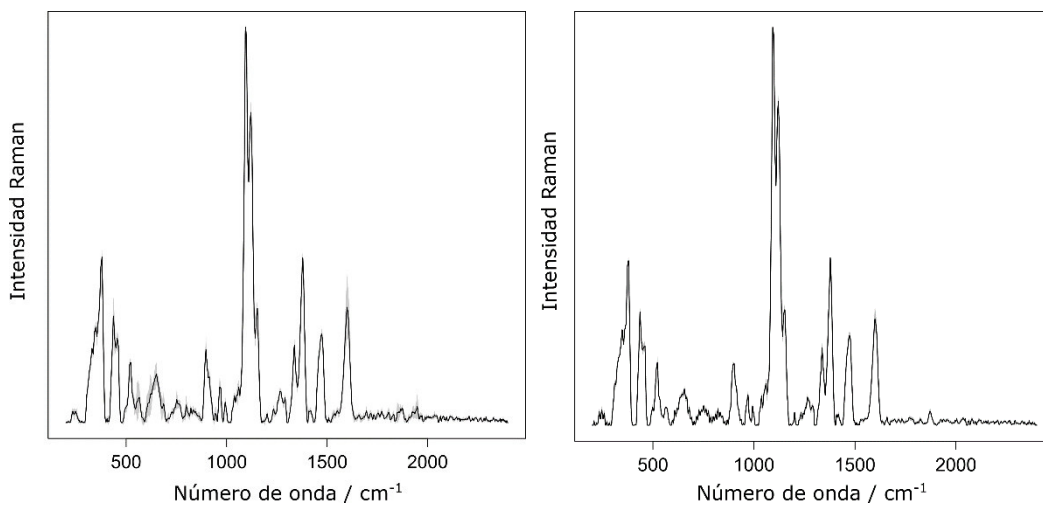
**Figura FTII.2** Espectros Raman para muestras paralelas de papel de paja toquilla (T = 160 °C, t = 32min, [NaOH]= 4%)



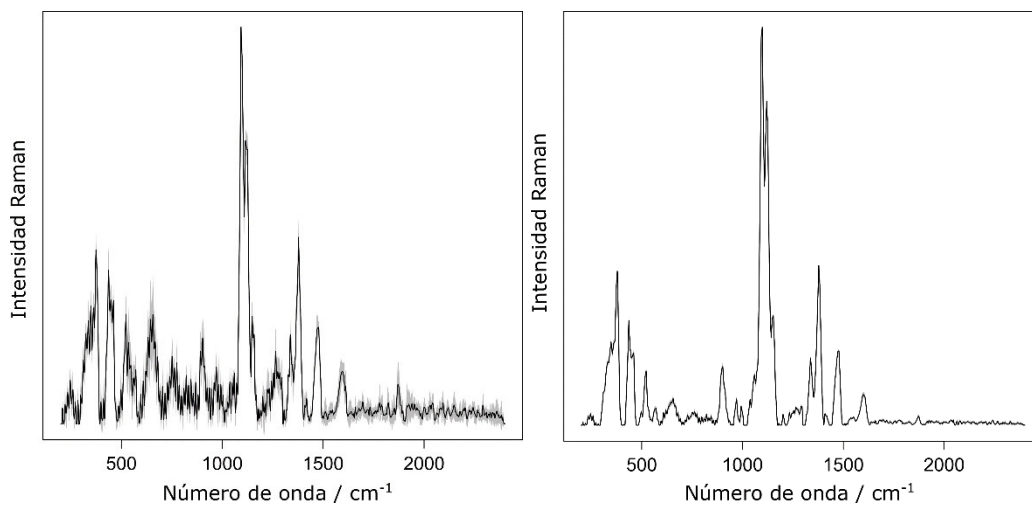
**Figura FTII.3** Espectros Raman para muestras paralelas de papel de paja toquilla ( $T = 160\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $t = 77,24$  min,  $[\text{NaOH}] = 4\%$ )



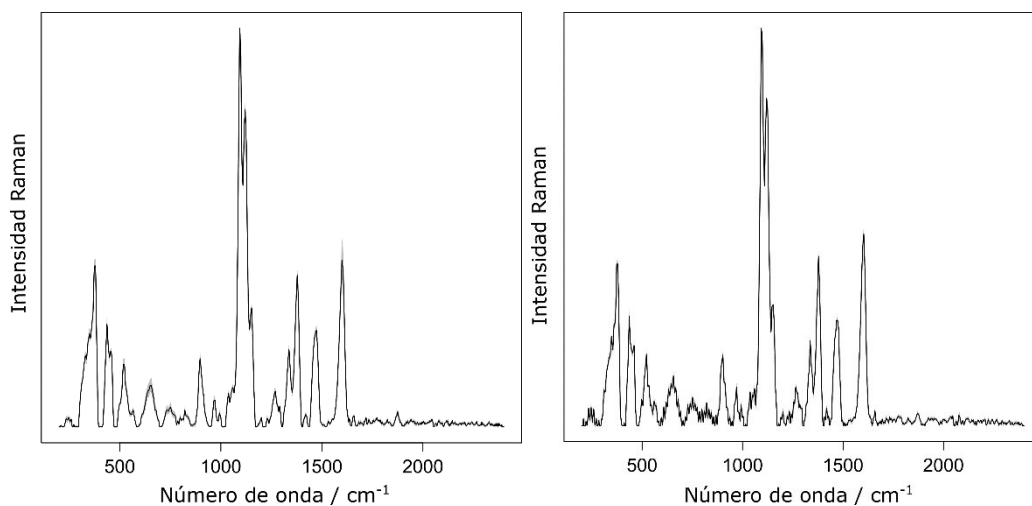
**Figura FTII.4** Espectros Raman para muestras paralelas de papel de paja toquilla ( $T = 160\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $t = 12$  min,  $[\text{NaOH}] = 7\%$ )



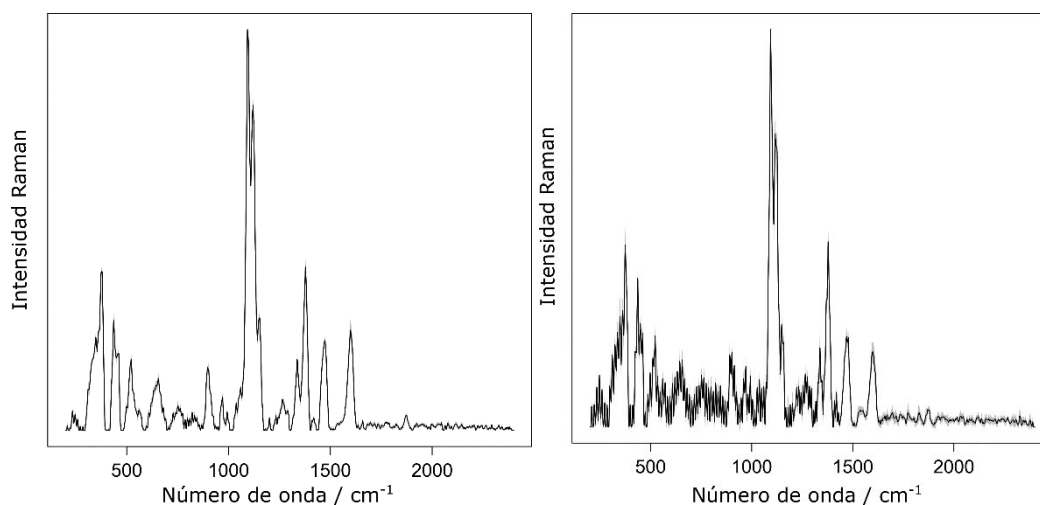
**Figura FTII.5** Espectros Raman para muestras paralelas de papel de paja toquilla ( $T = 160\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $t = 32$  min,  $[\text{NaOH}] = 7\%$ )



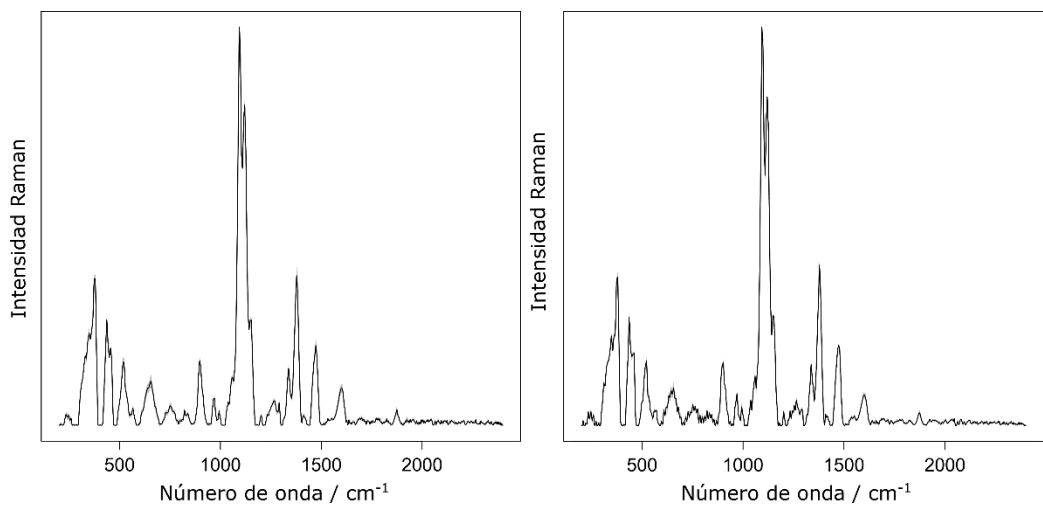
**Figura FTII.6** Espectros Raman para muestras paralelas de papel de paja toquilla ( $T = 160\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $t = 77,24$  min,  $[\text{NaOH}] = 7\%$ )



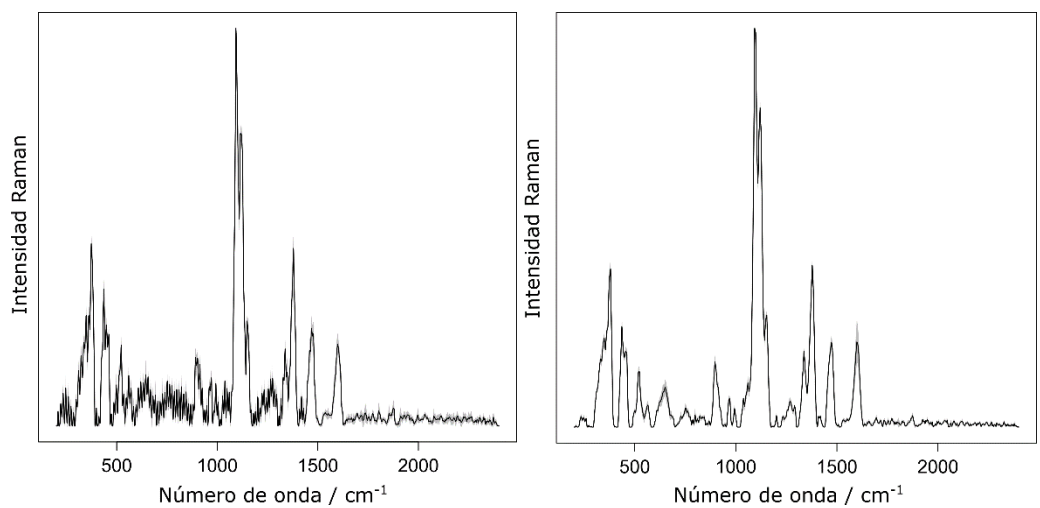
**Figura FTII.7** Espectros Raman para muestras paralelas de papel de paja toquilla ( $T = 170\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $t = 12$  min,  $[\text{NaOH}] = 4\%$ )



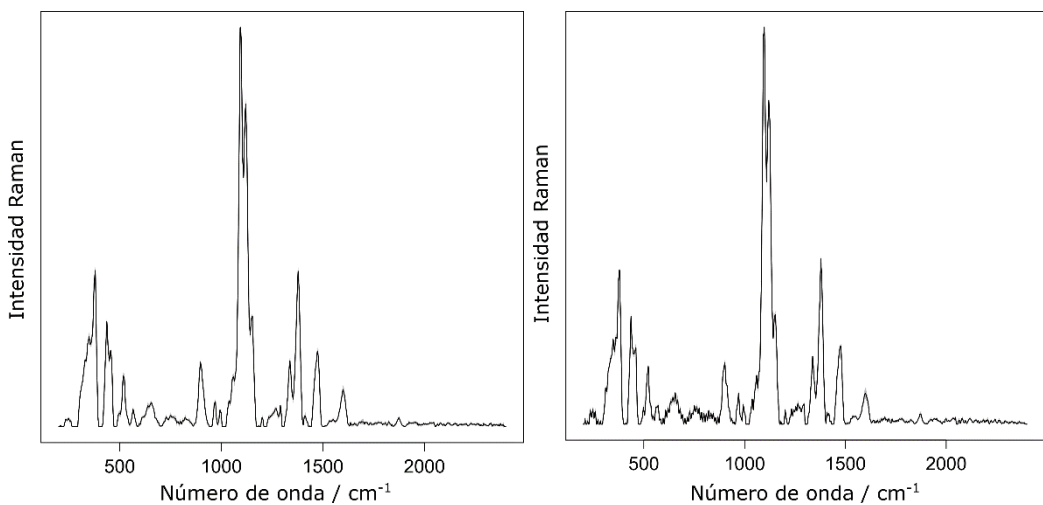
**Figura FTII.8** Espectros Raman para muestras paralelas de papel de paja toquilla ( $T = 170\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $t = 32$  min,  $[\text{NaOH}] = 4\%$ )



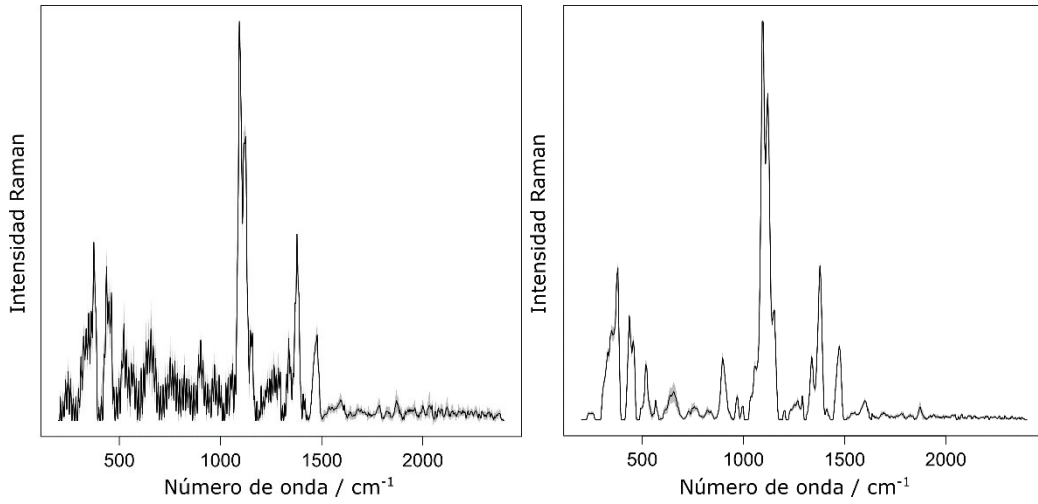
**Figura FTII.9** Espectros Raman para muestras paralelas de papel de paja toquilla ( $T = 170\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $t = 77,24\text{ min}$ ,  $[\text{NaOH}] = 4\%$ )



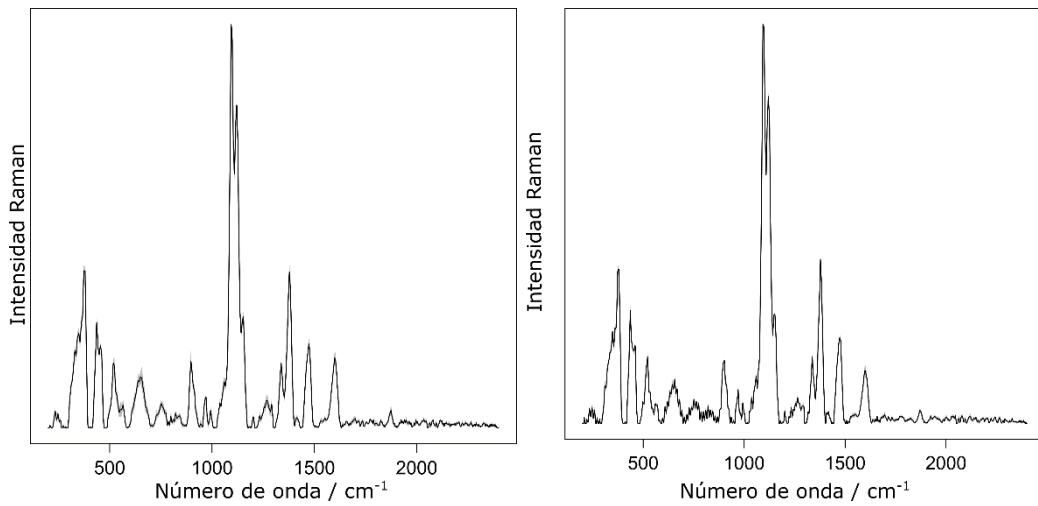
**Figura FTII.10** Espectros Raman para muestras paralelas de papel de paja toquilla ( $T=170\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $t=12\text{min}$ ,  $[\text{NaOH}] = 7\%$ )



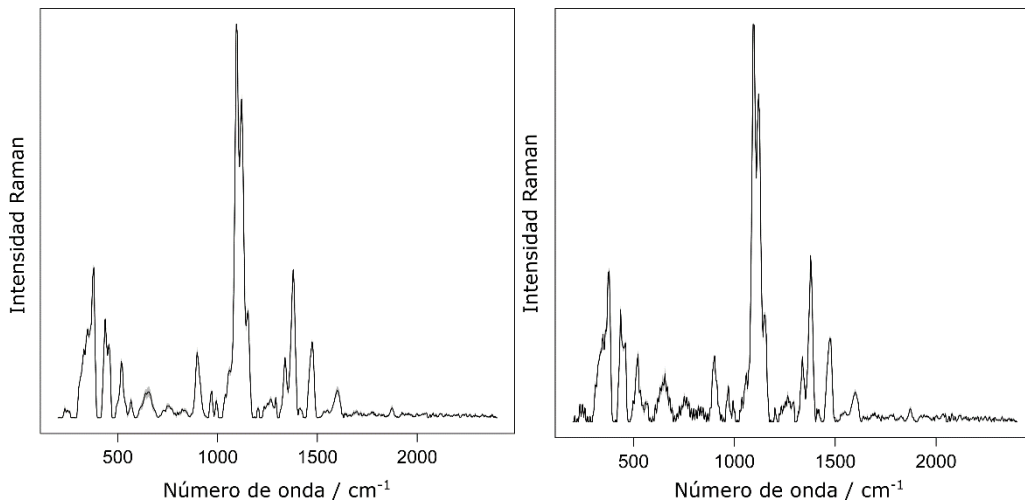
**Figura FTII.11** Espectros Raman para muestras paralelas de papel de paja toquilla ( $T = 170\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $t = 32\text{min}$ ,  $[\text{NaOH}] = 7\%$ )



**Figura FTII.12** Espectros Raman para muestras paralelas de papel de paja toquilla ( $T = 170\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $t = 77,24\text{ min}$ ,  $[\text{NaOH}] = 7\%$ )

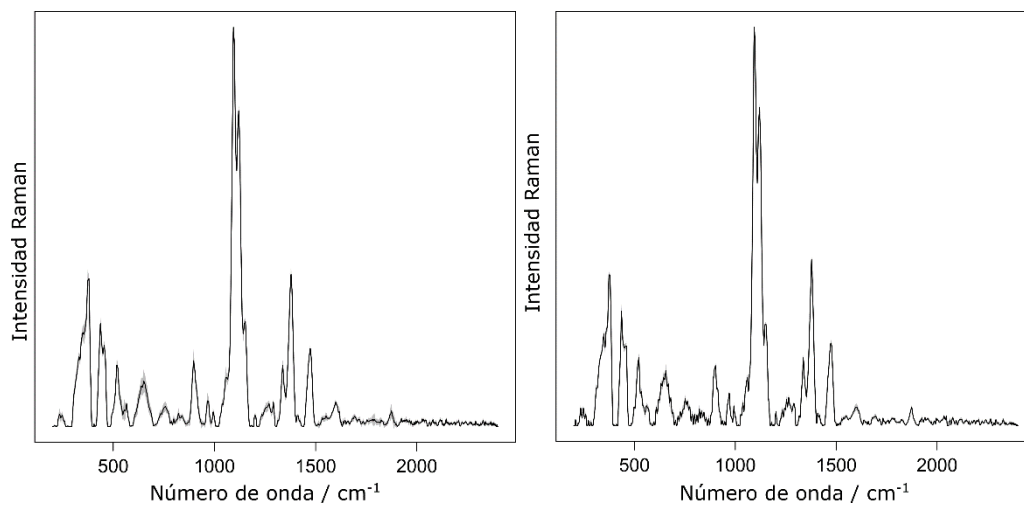


**Figura FTII.13** Espectros Raman para muestras paralelas de papel de paja toquilla ( $T = 180\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $t = 12\text{ min}$ ,  $[\text{NaOH}] = 7\%$ )

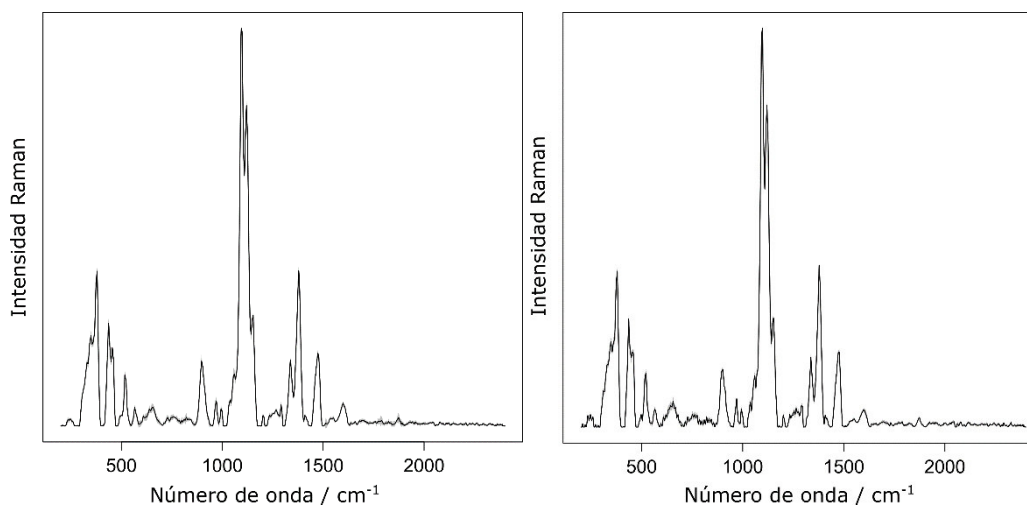


**Figura FTII.14** Espectros Raman para muestras paralelas de papel de paja toquilla ( $T = 180\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $t = 32\text{ min}$ ,  $[\text{NaOH}] = 4\%$ )

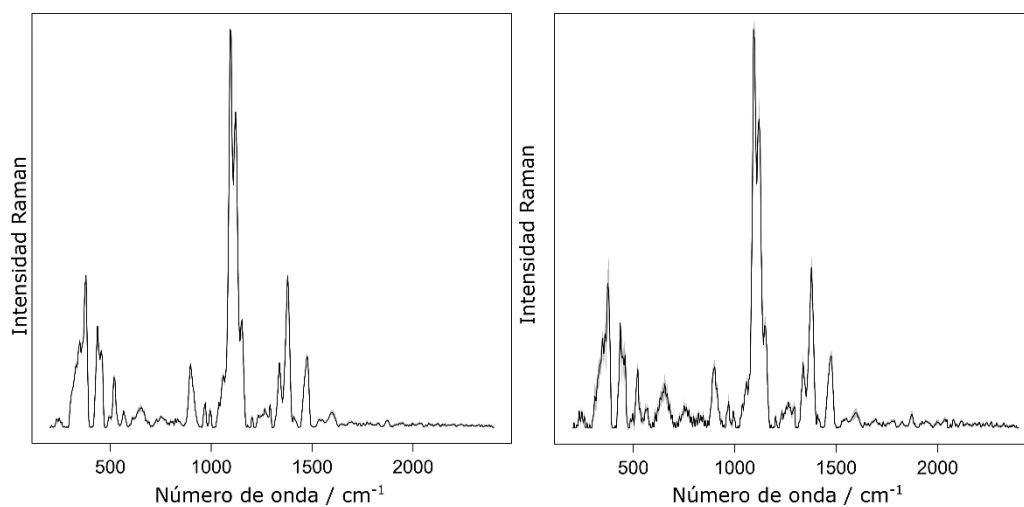




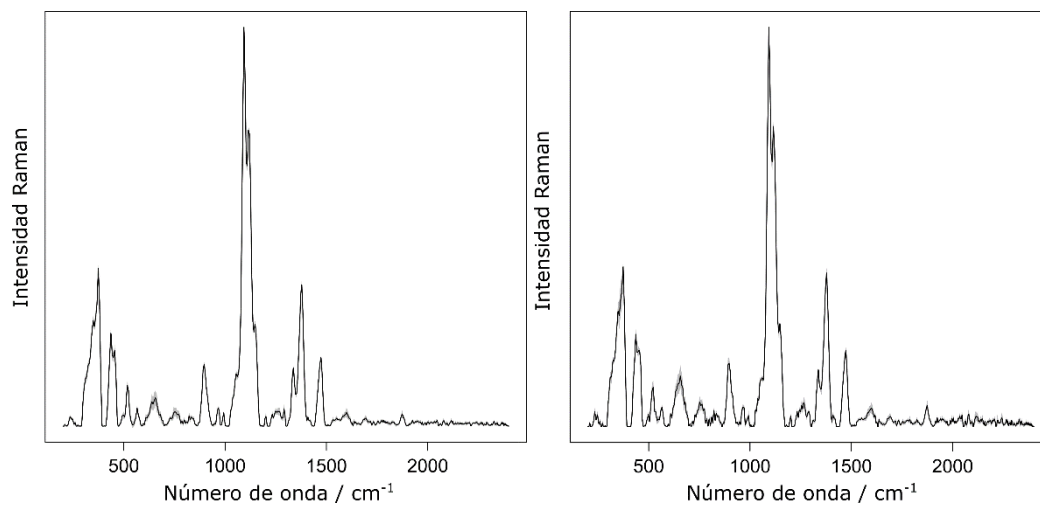
**Figura FTII.15** Espectros Raman para muestras paralelas de papel de paja toquilla ( $T = 180\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $t = 77,24\text{ min}$ ,  $[\text{NaOH}] = 4\%$ )



**Figura FTII.16** Espectros Raman para muestras paralelas de papel de paja toquilla ( $T = 180\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $t = 12\text{ min}$ ,  $[\text{NaOH}] = 7\%$ )



**Figura FTII.17** Espectros Raman para muestras paralelas de papel de paja toquilla ( $T = 180\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $t = 32\text{ min}$ ,  $[\text{NaOH}] = 7\%$ )



**Figura FTII.18** Espectros Raman para muestras paralelas de papel de paja toquilla ( $T = 180\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $t = 77,24\text{ min}$ ,  $[\text{NaOH}] = 7\%$ )

## FICHA TÉCNICA III

### DETERMINACIÓN DE LA ENERGÍA DE TRACCIÓN ABSORBIDA (TEA) EN HOJAS FABRICADAS A PARTIR DE PULPA DE PAJA TOQUILLA (*Carludovica palmata*)

**Objetivo:** Determinar la absorción de la energía de tracción en las hojas de papel de fibra de paja toquilla (*Carludovica palmata*).

$$TEA = \frac{9,807 * 10^4 * A'}{L * W} \quad [\text{AII. 1}]$$

Donde:

TEA = energía de tracción absorbida [J/m<sup>2</sup>].

A' = área bajo la curva carga-elongación [kgf \*cm].

L = lapso inicial de prueba [mm].

W = ancho de la muestra [mm].

El área bajo la curva carga-elongación, se calculó individualmente para cada tratamiento mediante el promedio de 7 áreas calculadas.

Ejemplo de cálculo para una muestra a condiciones de trabajo de: 160 °C, 12 min y 4% de NaOH; utilizando un L = 180 [mm], W = 25,4 [mm], A' = 31,425 [kgf \*cm].

$$TEA = \frac{9,807 * 10^4 * 3,143 \text{ [kgf * cm]}}{180 \text{ [mm]} * 25,4 \text{ [mm]}} = 67,41 \frac{J}{m^2}$$

**Tabla FTIII.1** Energía de tracción absorbida de los papeles de paja toquilla a diferentes condiciones de pulpaje

Temperatura [°C]	Tiempo [min]	Concentración NaOH [%]	TEA [J/m <sup>2</sup> ]
160	12	4	77,21 ± 1,48
	32		72,76 ± 1,83
	77,24		62,43 ± 1,56
	12	7	71,34 ± 1,74
	32		58,85 ± 1,86
	77,24		51,89 ± 1,19

**Tabla FTIII.1** Energía de tracción absorbida de los papeles de paja toquilla a diferentes condiciones de pulpaje (**continuación...**)

Temperatura [°C]	Tiempo [min]	Concentración NaOH [%]	TEA [J/m <sup>2</sup> ]
170	12	4	64,27 ± 1,27
	32		51,22 ± 1,33
	77,24		45,15 ± 1,68
	12	7	61,54 ± 1,65
	32		46,37 ± 1,41
	77,24		42,85 ± 0,83
180	12	4	59,98 ± 1,35
	32		47,32 ± 0,71
	77,24		40,61 ± 1,55
	12	7	51,31 ± 1,47
	32		29,61 ± 0,96
	77,24		77,21 ± 1,48

## FICHA TÉCNICA IV

### DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE TENSIÓN (TI) EN HOJAS FABRICADAS A PARTIR DE PULPA DE PAJA TOQUILLA (*Carludovica palmata*)

**Objetivo:** Determinar la absorción de la energía de tracción en las hojas de papel de paja toquilla (*Carludovica palmata*).

$$TI = \frac{T}{R} \text{ [AII. 2]}$$

Donde:

TI = Índice de tensión [N\*m/g].

T = resistencia a la tracción [N \*m].

R = gramaje [g/m<sup>2</sup>].

La resistencia a la tracción se calculó individualmente para cada tratamiento, mediante el promedio de 7 valores registrados.

Ejemplo de cálculo para una muestra a condiciones de trabajo de: 160 °C, 12 min y 4% de NaOH; utilizando un T = 3869,78 [N\*m], R = 72,73 [g/m<sup>2</sup>].

$$TI = \frac{3869,78 \text{ [N * m]}}{72,73 \text{ [g/m}^2\text{]}} = 53,21 \frac{\text{N * m}}{\text{g}}$$

**Tabla FTIV.1** Índice de tensión a diferentes condiciones de operación

Temperatura [°C]	Tiempo [min]	Concentración NaOH [%]	TI [N*m/g]
160	12	4	57,15 ± 0,35
	32		56,86 ± 0,32
	77,24		48,04 ± 0,26
	12	7	42,59 ± 0,15
	32		41,82 ± 0,24
	77,24		39,57 ± 0,57
170	12	4	56,06 ± 0,29
	32		44,09 ± 0,62
	77,24		38,60 ± 0,57
	12	7	38,19 ± 0,49

**Tabla FTIV.1** Índice de tensión a diferentes condiciones de operación (**continuación...**)

Temperatura [°C]	Tiempo [min]	Concentración NaOH [%]	TI [N*m/g]
170	32	7	36,70 ± 0,54
	77,24		35,05 ± 0,49
180	12	4	45,22 ± 0,87
	32		44,04 ± 0,62
	77,24		39,96 ± 0,51
	12	7	41,15 ± 0,50
	32		30,86 ± 0,85
	77,24		57,15 ± 0,35

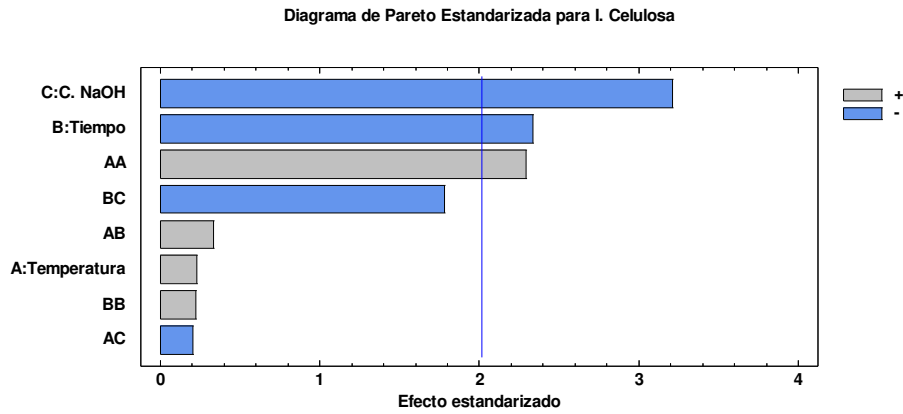
## FICHA TÉCNICA V

### ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA VARIANZA EN LA INTENSIDAD DE LOS ESPECTROS RAMAN DEL PAPEL DE FIBRA DE PAJA TOQUILLA (*Carludovica palmata*)

**Objetivo:** Determinar la influencia de la temperatura, tiempo y concentración de sosa en la intensidad de celulosa y lignina; realizando un análisis ANOVA mediante el software STATGRAPHICS CENTURION XVI.I, con un nivel de confianza del 95 %.

**Tabla FTV.1** Análisis estadístico ANOVA para la intensidad de la celulosa en los espectros Raman del papel de paja toquilla

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Temperatura	0,00000122224	1	0,00000122224	0,05	0,8175
B:Tiempo	0,00012386	1	0,00012386	5,46	0,0242
C:C. NaOH	0,000233344	1	0,000233344	10,29	0,0025
AA	0,000119383	1	0,000119383	5,26	0,0267
AB	0,00000254583	1	0,00000254583	0,11	0,7392
AC	9,21757E-7	1	9,21757E-7	0,04	0,8412
BB	0,00000110094	1	0,00000110094	0,05	0,8267
BC	0,0000721926	1	0,0000721926	3,18	0,0814
bloques	0,00066564	2	0,00033282	14,68	0,0000
Error total	0,000975143	43	0,0000226777		
Total (corr.)	0,00242891	53			



**Figura FTV.1** Diagrama de Pareto para la intensidad de la celulosa

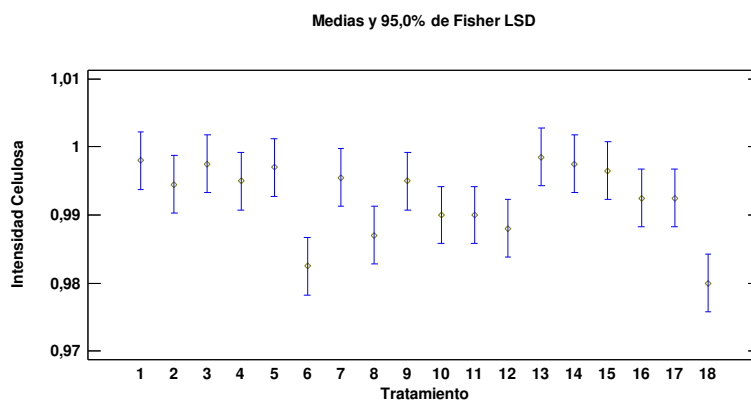
**Tabla FTV.2** Prueba de múltiples rangos para la intensidad de la celulosa en el papel de paja toquilla.

Tratamiento	Casos	Media	Grupos Homogéneos
18	3	0,98	X
6	3	0,9825	XX
8	3	0,987	XXX
12	3	0,988	XXX
11	3	0,99	XXX
10	3	0,99	XXX
17	3	0,9925	XXX
16	3	0,9925	XXX
2	3	0,9945	XXX
9	3	0,995	XXX
4	3	0,995	XXX
7	3	0,9955	XXX
15	3	0,9965	XX
5	3	0,997	XX
14	3	0,9975	XX
3	3	0,9975	XX



**Tabla FTV.2** Prueba de múltiples rangos para la intensidad de la celulosa en el papel de paja toquilla (**continuación...**)

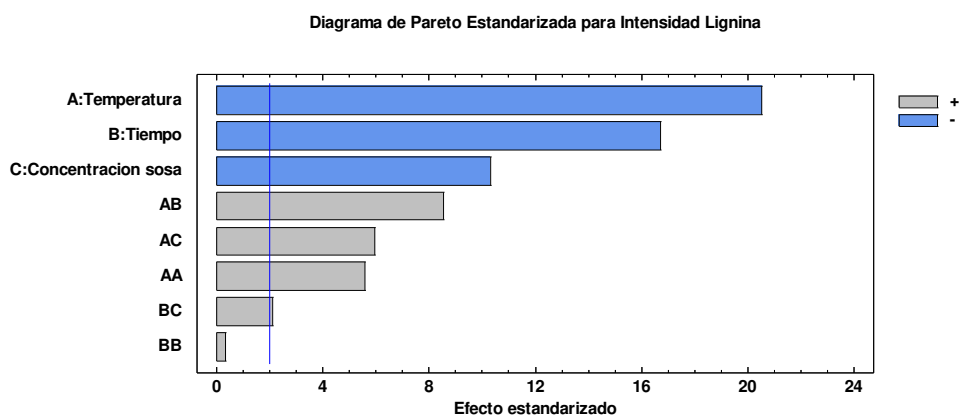
Tratamiento	Casos	Media	Grupos Homogéneos
1	3	0,998	XX
13	3	0,9985	X



**Figura FTV.2** Diagrama de Medias y Fisher LSD para la intensidad de la celulosa

**Tabla FTV.3** Análisis estadístico ANOVA para la intensidad de la lignina en los espectros Raman del papel de paja toquilla.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Temperatura	0,666716	1	0,666716	420,71	0,0000
B:Tiempo	0,442817	1	0,442817	279,43	0,0000
C:Concentracion sosa	0,169191	1	0,169191	106,76	0,0000
AA	0,049732	1	0,049732	31,38	0,0000
AB	0,116047	1	0,116047	73,23	0,0000
AC	0,0564039	1	0,0564039	35,59	0,0000
BB	0,000182529	1	0,000182529	0,12	0,7360
BC	0,00719891	1	0,00719891	4,54	0,0388
bloques	0,0203539	2	0,010177	6,42	0,0036
Error total	0,0681433	43	0,00158473		
Total (corr.)	2,25139	53			



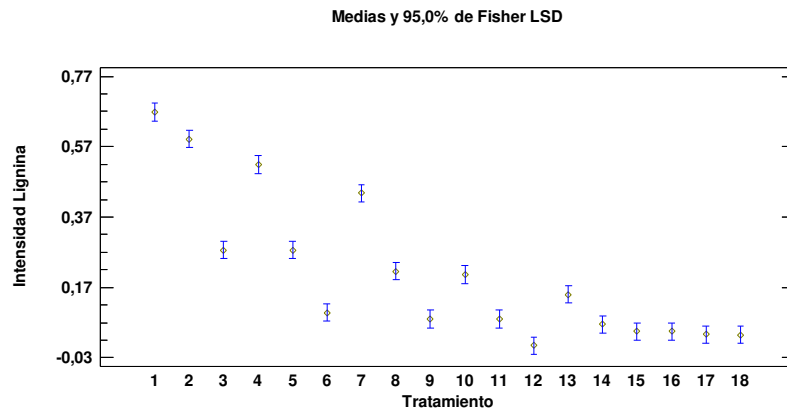
**Figura FTV.3** Diagrama de Pareto para la intensidad de la lignina

**Tabla FTV.4** Prueba de múltiples rangos para la intensidad de la lignina en el papel de paja toquilla

Tratamiento	Casos	Media	Grupos Homogéneos
12	3	0,00466667	X
18	3	0,035	XX
17	3	0,0366667	XX
15	3	0,045	XX
16	3	0,045	XX
14	3	0,065	XXX
11	3	0,08	XXX
9	3	0,08	XXX
6	3	0,098	XX
13	3	0,15	XX
10	3	0,206667	XX
8	3	0,216	XX
3	3	0,276	X
5	3	0,276	X
7	3	0,438	X
4	3	0,519	XX
2	3	0,591667	XX

**Tabla FTV.4** Prueba de múltiples rangos para la intensidad de la lignina en el papel de paja toquilla (**continuación...**)

Tratamiento	Casos	Media	Grupos Homogéneos
1	3	0,668	X



**Figura FTV.4** Diagrama de Medias y Fisher LSD para la intensidad de la lignina

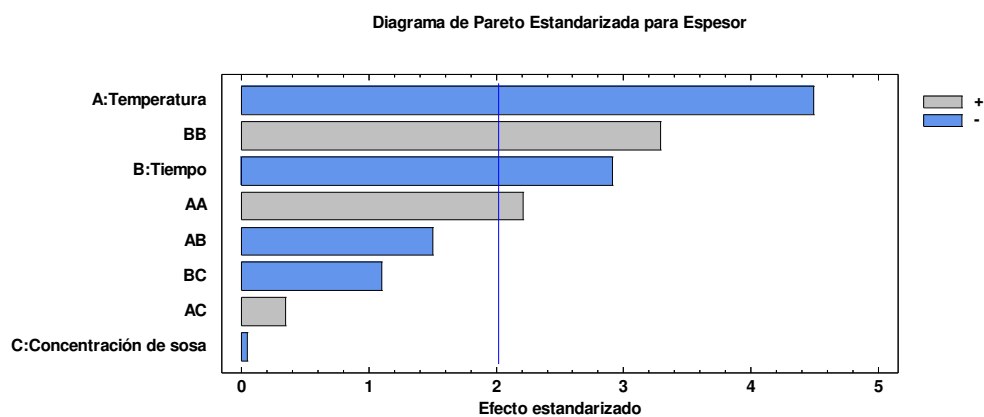
## FICHA TÉCNICA VI

### ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA VARIANZA PARA EL ESPESOR DE LAS HOJAS DE PAPEL FABRICADAS A PARTIR DE LA PULPA DE PAJA TOQUILLA (*Carludovica palmata*)

**Objetivo:** Determinar la influencia de la temperatura, tiempo y concentración de sosa en el espesor; realizando un análisis ANOVA mediante el software STATGRAPHICS CENTURION XVII.I, con un nivel de confianza del 95 %.

**Tabla FTVI.1** Análisis estadístico ANOVA para es espesor de las hojas de papel elaboradas con pulpa de paja toquilla

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Temperatura	0,00171443	1	0,00171443	20,17	0,0001
B:Tiempo	0,000722121	1	0,000722121	8,49	0,0056
C:Concentración de sosa	1,9105E-7	1	1,9105E-7	0,00	0,9624
AA	0,000414296	1	0,000414296	4,87	0,0327
AB	0,000192253	1	0,000192253	2,26	0,1400
AC	0,0000103164	1	0,0000103164	0,12	0,7293
BB	0,00092134	1	0,00092134	10,84	0,0020
BC	0,000104023	1	0,000104023	1,22	0,2748
bloques	0,00243378	2	0,00121689	14,31	0,0000
Error total	0,00365578	43	0,0000850182		
Total (corr.)	0,0118415	53			



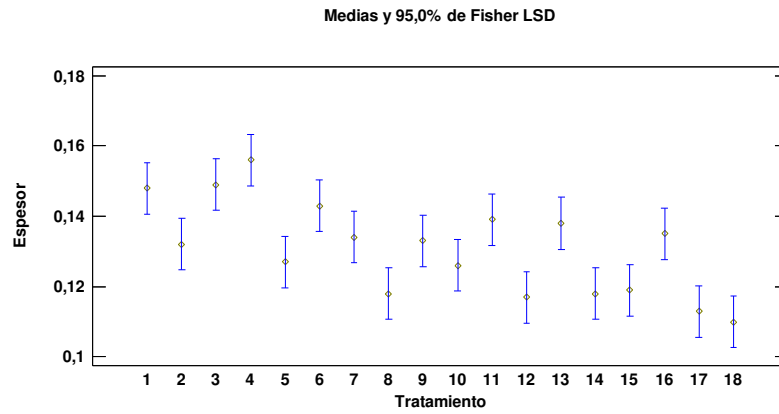
**Figura FTVI.1** Diagrama de Pareto para el espesor.

**Tabla FTVI.2** Prueba de múltiples rangos para el espesor del papel

Tratamiento	Casos	Media	Grupos Homogéneos
18	3	0,11	X
17	3	0,113	XX
12	3	0,117	XXX
8	3	0,118	XXX
14	3	0,118	XXX
15	3	0,119	XXX
10	3	0,126	XXXX
5	3	0,127	XXXX
2	3	0,132	XXXXX
9	3	0,133	XXXXX
7	3	0,134	XXXXX
16	3	0,135	XXXXX
13	3	0,138	XXXX
11	3	0,139	XXXX
6	3	0,143	XXX
1	3	0,148	XX
3	3	0,149	XX

**Tabla FTVI.2** Prueba de múltiples rangos para el espesor del papel (**continuación...**)

Tratamiento	Casos	Media	Grupos Homogéneos
4	3	0,156	X



**Figura FTVI.2** Diagrama de Medias y Fisher LSD para el espesor

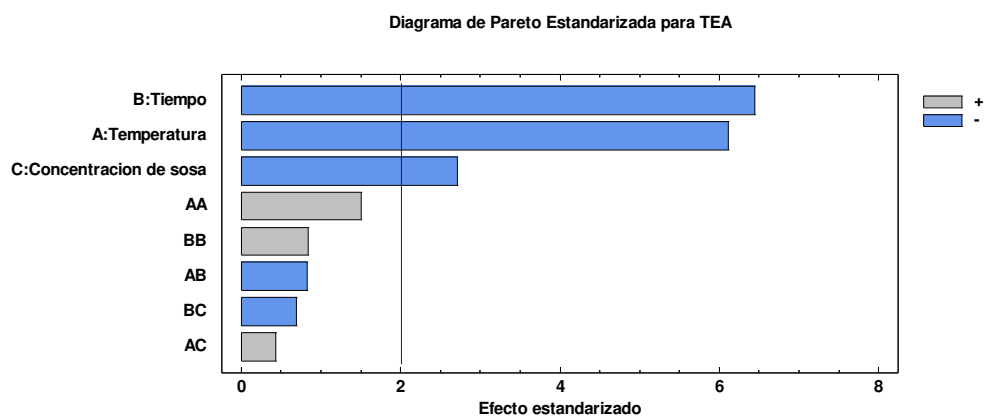
## FICHA TÉCNICA VII

### ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA VARIANZA DE LA ENERGÍA DE TRACCIÓN ABSORBIDA (TEA) [J/m<sup>2</sup>] DE LAS HOJAS DE PAPEL FABRICADAS A PARTIR DE LA PULPA DE PAJA TOQUILLA (*Carludovica palmata*)

**Objetivo:** Determinar la influencia de la temperatura, tiempo y concentración de sosa en la energía de tracción absorbida (TEA); realizando un análisis ANOVA mediante el software STATGRAPHICS CENTURION XVI.I, con un nivel de confianza del 95 %.

**Tabla FTVII.1** Análisis estadístico ANOVA para la energía de tracción absorbida (TEA) de las hojas de papel elaborados con pulpa de paja toquilla.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Temperatura	2474,82	1	2474,82	37,42	0,0000
B:Tiempo	2748,05	1	2748,05	41,55	0,0000
C:Concentracion de sosa	488,429	1	488,429	7,38	0,0094
AA	150,9	1	150,9	2,28	0,1382
AB	45,1079	1	45,1079	0,68	0,4135
AC	12,4725	1	12,4725	0,19	0,6663
BB	46,7339	1	46,7339	0,71	0,4052
BC	32,2161	1	32,2161	0,49	0,4890
bloques	70,2775	2	35,1387	0,53	0,5917
Error total	2844,2	43	66,1443		
Total (corr.)	13678,3	53			



**Figura FTVII.1** Diagrama de Pareto para el TEA (energía de tracción absorbida)

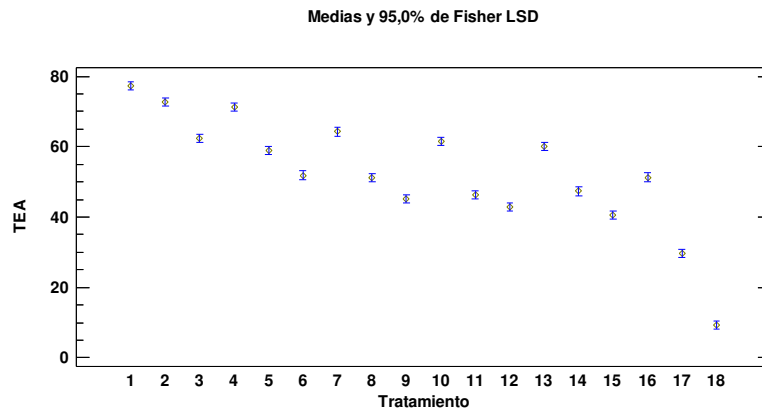
**Tabla FTVII.2** Prueba de múltiples rangos para el TEA (energía de tracción absorbida)

Tratamiento	Casos	Media	Grupos Homogéneos
18	3	9,33067	X
17	3	29,612	X
15	3	40,6117	X
12	3	42,8523	XX
9	3	45,1503	XX
11	3	46,3723	XX
14	3	47,3227	XX
8	3	51,2213	XX
16	3	51,307	XX
6	3	51,8903	X
5	3	58,8487	X
13	3	59,9813	XX
10	3	61,5427	XX
3	3	62,4293	XX
7	3	64,267	X
4	3	71,3427	X
2	3	72,7567	X



**Tabla FTVII.2** Prueba de múltiples rangos para el TEA (energía de tracción absorbida)  
(continuación...)

Tratamiento	Casos	Media	Grupos Homogéneos
1	3	77,2127	X



**Figura FTVII.2** Diagrama de Medias y Fisher LSD para el TEA (energía de tracción absorbida)

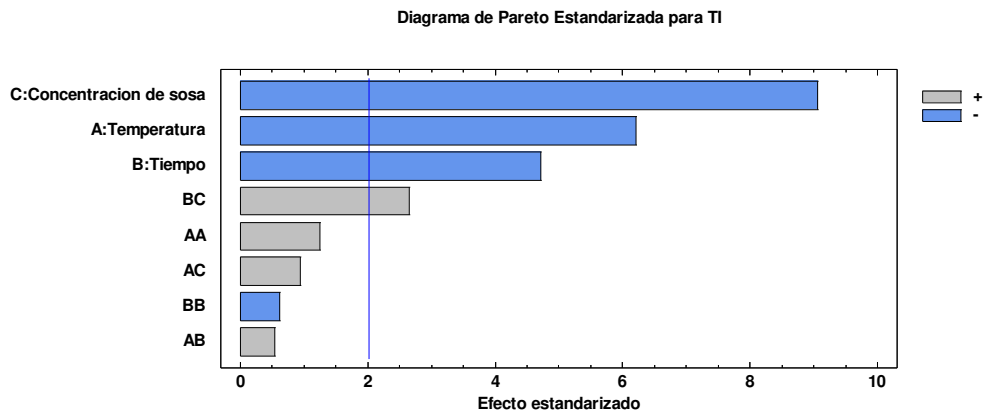
## FICHA TÉCNICA VIII

### ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA VARIANZA DEL ÍNDICE DE TENSIÓN (TI) [N\*m/g] DE LAS HOJAS DE PAPEL FABRICADAS A PARTIR DE PULPA DE PAJA TOQUILLA (*Carludovica palmata*)

**Objetivo:** Determinar la influencia de la temperatura, tiempo y concentración de sosa en el Índice de tensión (TI); realizando un análisis ANOVA mediante el software STATGRAPHICS CENTURION XVI.I, con un nivel de confianza del 95 %.

**Tabla FTVIII.1** Análisis estadístico ANOVA para el Índice de tensión(TI) de las hojas de papel elaborados con pulpa de paja toquilla

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Temperatura	554,615	1	554,615	38,55	0,0000
B:Tiempo	320,005	1	320,005	22,24	0,0000
C:Concentracion de sosa	1179,86	1	1179,86	82,01	0,0000
AA	22,5923	1	22,5923	1,57	0,2169
AB	4,33181	1	4,33181	0,30	0,5860
AC	12,7847	1	12,7847	0,89	0,3511
BB	5,51547	1	5,51547	0,38	0,5391
BC	100,925	1	100,925	7,01	0,0113
bloques	8,84074	2	4,42037	0,31	0,7371
Error total	618,656	43	14,3874		
Total (corr.)	3790,01	53			



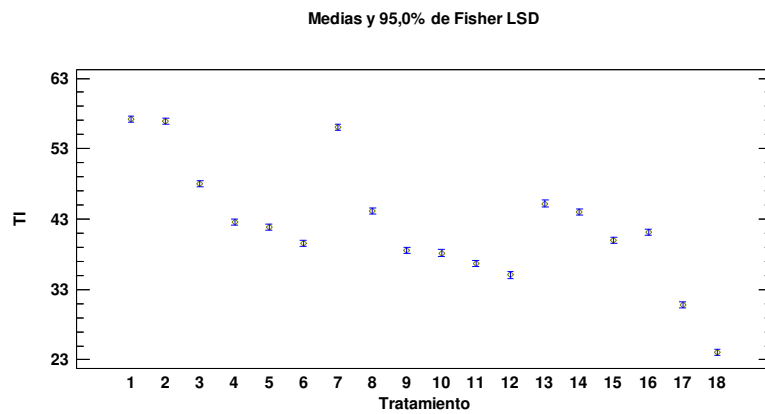
**Figura FTVIII.1** Diagrama de Pareto para el TI (Índice de tensión)

**Tabla FTVIII.2** Prueba de múltiples rangos para el TI (Índice de tensión)

Tratamiento	Casos	Media	Grupos Homogéneos
18	3	24,12	X
17	3	30,86	X
12	3	35,0467	X
11	3	36,6967	X
10	3	38,1867	XX
9	3	38,6	XX
6	3	39,57	XXX
15	3	39,9567	XX
16	3	41,15	XX
5	3	41,82	X
4	3	42,59	XX
14	3	44,04	XX
8	3	44,0867	XX
13	3	45,22	X
3	3	48,04	X
7	3	56,06	X
2	3	56,8567	X

**Tabla FTVIII.2** Prueba de múltiples rangos para el TI (Índice de tensión)  
(continuación...)

Tratamiento	Casos	Media	Grupos Homogéneos
1	3	57,15	X



**Figura FTVIII.2** Diagrama de Medias y Fisher LSD para el TI (índice de tensión)