



Estudio de especies no leñosas de la provincia de Loja (Ecuador) como potenciales materias primas para la fabricación de papel artesanal

Non-woody species study from Loja Province (Ecuador) as potential raw materials for handmade paper manufacture

García-Berfon Luis

Universidad Técnica Particular de Loja, Ecuador
Departamento de Química y Ciencias Exactas
Sección de Química Básica y Aplicada
Correo: lvigarcia4@utpl.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-1936-4926>

Armijos-Riofrio Chabaco

Universidad Técnica Particular de Loja, Ecuador
Departamento de Química y Ciencias Exactas
Sección de Química Básica y Aplicada
Correo: cparmijos@utpl.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-3252-9932>

Aguilar-Ramírez Silvio

Universidad Técnica Particular de Loja, Ecuador
Departamento de Química y Ciencias Exactas
Sección de Química Básica y Aplicada
Correo: sdaguilar@utpl.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-4771-8103>

López-Cordova Carmen

Universidad Técnica Particular de Loja, Ecuador
Departamento de Química y Ciencias Exactas
Sección de Química Básica y Aplicada
Correo: cmgarcia77@utpl.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0003-3759-3957>

Ramírez-Robles Jorge

Universidad Técnica Particular de Loja, Ecuador
Departamento de Química y Ciencias Exactas
Sección de Química Básica y Aplicada
Correo: jyramirez@utpl.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-8839-7457>

Calva-Luzon Mayra

Universidad Técnica Particular de Loja, Ecuador
Correo: misabelitac@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-3753-1246>

Pogo-Tacuri Enith

Universidad Técnica Particular de Loja, Ecuador
Correo: enithpt@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-2808-2709>

Resumen

Se analizaron quince especies no leñosas de Loja, Ecuador: *Linum usitatissimum* L., *Sida rhombifolia* L., *Sida poeppigiana* (K.Schum.) Fryxell., *Hibiscus rosa-sinensis* L., *Alcea rosea* L., *Lavatera arborea* L., *Cortaderia jubata* Stapf., *Andropogon gayanus* Kunth., *Guadua angustifolia* Kunth., *Saccharum sinense* Roxb., *Arundo donax* L., *Yucca guatemalensis* Baker., *Agave americana* L., *Agave americana* var. *marginata* Trel. in L.H.Bailey., y *Saccharum officinarum* L., con el objetivo de estudiar el potencial de las fibras extraídas para la manufactura de papel artesanal. Las especies seleccionadas son abundantes en la región sur del Ecuador y fueron recolectadas manualmente con autorización del Ministerio del Ambiente. La extracción mecánica de fibras, separación y caracterización de sus componentes, se realizó utilizando las normas TAPPI recomendadas. Luego con las fibras extraídas se elaboró papel artesanal usando el método alcalino de cocción para la preparación de la pulpa, con subsecuente formación y secado del papel elaborado. El control de calidad en el papel final se realizó mediante la determinación del número de Kappa, gramaje, pH, resistencia a la explosión y humedad del papel. El rendimiento de las especies en cuanto a obtención de fibra, varía de 4 % en *Agave americana* L., a 42 % en *Guadua angustifolia* Kunth. El análisis químico estuvo comprendido entre los siguientes intervalos: celulosa total entre 16 % y 59 %, distribuida como α -celulosa de 11.36 % a 49.56 %; β -celulosa de 0.8 % a 7.5 %; y γ -celulosa 0.24 % a 13.72 %. El análisis multicriterio indica que las especies de *Hibiscus rosa-sinensis* L., *Saccharum officinarum* L., *Arundo donax* L., *Agave americana* var. *marginata* Trel., y *Saccharum sinense* Roxb., representan las mejores alternativas para la fabricación de papel artesanal.

Descriptores: Fibras no leñosas, celulosa, despulpado, fabricación de papel, análisis multicriterio, pasta mecánica.

Abstract

Fifteen non-woody species from Loja, Ecuador: *Linum usitatissimum* L., *Sida rhombifolia* L., *Sida poeppigiana* (K.Schum.) Fryxell., *Hibiscus rosa-sinensis* L., *Alcea rosea* L., *Lavatera arborea* L., *Cortaderia jubata* Stapf., *Andropogon gayanus* Kunth., *Guadua angustifolia* Kunth., *Saccharum sinense* Roxb., *Arundo donax* L., *Yucca guatemalensis* Baker., *Agave americana* L., *Agave americana* var. *marginata* Trel., and *Saccharum officinarum* L., were analyzed to study the potential of extracted fibers for artisanal paper making. The selected species are abundant in the southern region of Ecuador and were collected manually with the Environment Ministry authorization. The mechanical extraction of fibers, separation, and characterization of their components, was carried out using the appropriate TAPPI tests. Then with the extracted fibers, an artisanal paper was made using the alkaline cooking method for the preparation of the pulp, with subsequent formation and drying of the paper. Quality control in the final paper was realized by determining the kappa number, grammage, pH, blast resistance, and moisture in the final paper. The yield of these species in terms of obtaining fiber varies from 4 % in *Agave americana* L., to 42 % for *Guadua angustifolia* Kunth., and the following intervals in chemical analysis: total cellulose 16 % to 59 %, distributed as α -cellulose: 11.36 % to 49.56 %; β -cellulose: 0.8 % to 7.5 %; and γ -cellulose 0.24 % to 13.72 %. According to multicriteria analysis, species *Hibiscus rosa-sinensis* L., *Saccharum officinarum* L., *Arundo donax* L., *Agave americana* var. *marginata* Trel., and *Saccharum sinense* Roxb., represent the best alternatives for paper making.

Keywords: Non-woody fibers, pulping, paper making, cellulose, multi-criteria analysis, mechanical pulping.

INTRODUCCIÓN

La celulosa es el biopolímero más abundante en la naturaleza, se considera el componente fundamental de la pared de las células vegetales en plantas, madera y fibras naturales. Se encuentra generalmente combinado con lignina, hemicelulosa, pectinas y ácidos grasos (Puranen *et al.*, 2014). Los derivados de celulosa tales como metilcelulosa, hidroxipropilcelulosa y carboximetilcelulosa son empleados como biomateriales (Zhang *et al.*, 2014). La primera clasificación analítica del material celulósico y hemicelulósico define la fracción alfa (α) como la insoluble en solución de NaOH, la fracción beta (β) la cual precipita por neutralización y la fracción gamma (γ) que permanece en solución. No existe beta celulosa en la planta, sino que se forma por degradación de la alfa celulosa durante el procesamiento químico o mecánico para obtener la pulpa (Emerton, 1965).

Las fibras no leñosas son materiales vegetales celulósicos distintos de la madera, de los cuales se pueden extraer fibras para la fabricación de papel. Estos materiales fueron los primeros usados para hacer el papel, pero a finales del siglo XVII la madera pasó a ser la principal proveedora de fibra en Europa (Bull *et al.*, 1999). En regiones de Asia y África, donde la fibra de madera es relativamente menos abundante, se producen cantidades considerables de pulpa derivada de fibras no leñosas (Bajpai, 2017). El uso de productos no maderables está creciendo debido al aumento en la demanda de materia prima fibrosa y a la utilización de los recursos naturales de cada país (Escoto *et al.*, 2015). Actualmente, hay una gran preocupación por la disminución en la cantidad de plantas leñosas existentes (Bettenfeld *et al.*, 2020). Las fibras no leñosas de cultivos de campo y residuos agrícolas, como materia prima para la fabricación de pulpa y papel, es una buena alternativa para desarrollar una bio-economía (Toppinen *et al.*, 2017; Gonzalo *et al.*, 2017; Moral *et al.*, 2016; Kaur *et al.*, 2016; Mechi *et al.*, 2017).

Por otra parte, el empleo de fibras no leñosas para la fabricación de papel contribuiría a reducir la demanda de madera para pasta, la cual afecta bosques naturales y plantaciones en gran escala (Ashori, 2006). La variedad de tamaños en estas fibras hace posible la producción de papeles especiales, como bolsas de té, filtros de papel, billetes de banco, etcétera (Marques *et al.*, 2010). Diversos autores han reportado el uso de fibras no leñosas para la manufactura de papel, entre ellas cabuya y banano (Aguilar *et al.*, 2007), tagasaste (García *et al.*, 2008), plantas de la familia Agave (Escoto *et al.*, 2006; Parra *et al.*, 2010), plátano (Sosa *et al.*, 2011), fibras de coco (Mazlana *et al.*, 2014), nopal (Mannai *et al.*, 2016).

Otras aplicaciones de las fibras no leñosas incluyen la producción de biomateriales y biocombustibles de segunda generación (Harris, 2017), aditivos para suelos arenosos (Ghadakpour *et al.*, 2020), biocompuestos (Bormaud *et al.*, 2019), materiales compuestos (Deuydt *et al.*, 2019), emulsionantes o aditivos en alimentos, y aditivos en el área de fabricación de papel y cartón (Eriksen *et al.*, 2008; Alila *et al.*, 2013). Ecuador, Perú y Bolivia conforman una región natural con gran diversidad biológica de ecosistemas forestales y no forestales, donde los pobladores han utilizado múltiples especies de plantas como materia prima para aplicaciones en artesanía (Moraes *et al.*, 2006).

En el presente trabajo se analizan quince especies no leñosas de diversas familias abundantes en la provincia de Loja (Ecuador), con el objetivo de determinar su potencial uso como materias primas para la obtención de papel artesanal. El análisis de las fracciones extraídas en las especies y de las propiedades del papel, se realizó siguiendo las normas TAPPI, y las normas INEN. La selección de las especies adecuadas se realizó aplicando un análisis multicriterio tomando como criterios los parámetros considerados más relevantes.

DESARROLLO

RECOLECCIÓN DEL MATERIAL VEGETAL

Se realizó en la ciudad de Loja y cantones de la provincia, mediante un corte manual, tomando como referencia la madurez y tamaño de las hojas y tallos. La colección de las plantas se llevó a cabo con la autorización N°001-IC-FLO-DBAP-VS-DRLZCH-MA-2009 del Ministerio del Ambiente del Ecuador, y fueron clasificadas taxonómicamente por el Herbario de la Universidad Nacional de Loja (HUNL). La sistemática y nomenclatura de las especies reportadas en este estudio, estuvo basada en el "Catálogo de plantas vasculares del Ecuador" (Jorgensen & León, 1999). En el material recolectado se eliminan las hojas secas y en mal estado, los tallos pequeños, hojas y flores. En la Tabla 1 se indica la localización y principales características de las especies estudiadas.

Las muestras recolectadas fueron tratadas de acuerdo con la siguiente metodología:

Preparación de las muestras: Se realizó siguiendo la norma TAPPI T-11 m-59.

Determinación de solubles en alcohol-benceno: La determinación de extractos solubles en la mezcla etanol-ben-

Tabla 1. Localización y principales características de las especies estudiadas

Nombre científico	Familia	Nombre común	Parte utilizada	Lugar de recolección	Medida de la planta
<i>Agave americana</i> L.	Agavaceae	Penco, chaguarquero, Méjico	hojas	Loja	1,50-1,80 m de largo; 0.06-0.10 m de ancho
<i>Agave americana</i> var. <i>marginata</i>	Agavaceae	Pita, penco	hojas	San Pedro de la Bendita	1.50-1.80 cm de largo; 0.06-0.10 cms de ancho
<i>Alcea rosea</i> L.	Malvaceae	Malva, malva goma, malva rosa	tallos	Chuquiribamba	2,5 m de altura
<i>Andropogon gayanus</i> Kunth	Poaceae	Cariamanga	tallos	Loja	1-3 m de largo
<i>Arundo donax</i> L.	Poaceae	Carrizo	tallos	Loja	6-8 m de largo
<i>Cortaderia jubata</i> Lemoine (ex Carriere) Stapf	Poaceae	Cortadera, siksi, zig-zig	hojas	Loja	3 m de altura
<i>Guadua angustifolia</i> Kunth	Poaceae	Guadua	tallos	Landagui	18-22 m de largo; diámetro 0.18 m
<i>Hibiscus rosa-sinensis</i> L.	Malvaceae	Flor de rey	tallos	Loja	5 m de altura
<i>Lavatera arborea</i> L.	Malvaceae	Malva, malva blanca	tallos	San Lucas	2-3 m de altura
<i>Linum usitatissimum</i> L.	Linaceae	Lino	tallos	Chuquiribamba	0.40-0.80 m de altura
<i>Saccharum sinense</i> Roxb	Poaceae	King gras	tallos	Loja	3,5 m de altura
<i>Saccharum officinarum</i> L.	Poaceae	Caña de azúcar	tallos	Catamayo	3-6 m de altura; 0.02-0.05 m de diámetro
<i>Sida poeppigiana</i> K. Schum Fryxell	Malvaceae	Cosa – cosa	tallos	Catamayo	1,5 m de altura
<i>Sida rhombifolia</i> L.	Malvaceae	Cosa – cosa, huitungo, wisho	tallos	Loja	1 m de altura
<i>Yucca guatemalensis</i> Baker	Agavaceae	Flor de novia	hojas	Loja	2-4 m de altura

ceno, se realizó de acuerdo con la norma TAPPI T-605-59. El porcentaje de extracto (%Extr) fue calculado por medio de la siguiente ecuación:

$$\% Extr = \left(\frac{P_{bf} - P_{b0}}{P_{ms}} \right) * 100 \quad (1)$$

Determinación de celulosa total: En esta prueba los constituyentes no celulósicos de la planta se vuelven solubles por cloración. La prueba se realizó siguiendo la norma TAPPI T 17 m-55. El porcentaje de celulosa total (%Cel_T) fue calculado usando la ecuación (2).

$$\% Cel_T = \left(\frac{P_{bf} - P_{b0}}{P_{ms}} \right) * 100 \quad (2)$$

Dónde: P_{bf}, P_{b0} y P_{ms} corresponden al peso final del balón, peso inicial del balón y peso de muestra seca, respectivamente.

Extracción mecánica de la fibra: Se realizó en un molino de rodillos para la eliminación de líquidos enzimáticos, agua, ácidos orgánicos y demás elementos de bajo peso molecular denominados extractivos. Las fibras extraídas son lavadas con agua potable para eliminar impurezas ajenas a la fibra, partes de cortezas y hojas no molidas, y posteriormente se secan entre 35 y 50 °C durante 2 días.

Cocción de la fibra extraída: Se utilizó un recipiente de acero inoxidable, con una solución a 10 % de NaOH y un tiempo de 50 minutos (Aguilar *et al.*, 2007). Con este proceso se desea eliminar gran parte de lignina, otras impurezas y suavizar las fibras sin causar deterioro. El lavado de las fibras se realizó con agua potable hasta un pH comprendido entre 6.5 y 7.5. Las fibras se secaron entre 35 y 50 °C durante 2 días y almacenadas en fundas de polietileno a temperatura ambiente en un lugar fresco y seco.

Determinación de alfa, beta y gamma celulosa (norma TAPPI T-203 os-61): Consiste en tratar la muestra con una solución acuosa al 17.5 %p de NaOH durante 45 min, reduciendo luego dicha concentración a 8.3 %p para precipitar la α -celulosa, permaneciendo en solución la beta (β . cel) y gamma (γ . cel) celulosa. El porcentaje de alfa celulosa (% α .cel) fue calculado usando la ecuación (3).

$$\% \alpha.cel = \left(\frac{P_{bf} - P_{b0}}{P_{ms}} \right) * 100 \quad (3)$$

Se toma una alícuota del filtrado separado en la determinación de alfa celulosa, y se acidifica con solución de ácido acético hasta alcanzar un pH comprendido entre 6 y 7 para precipitar la β -celulosa. El precipitado formado se separa por filtración, lavando con agua destilada, luego se seca en la estufa a 105 °C hasta peso constante. El porcentaje de beta celulosa (% β .cel) se calculó usando la ecuación (4).

$$\% \beta.cel = \left(\frac{P_{bf} - P_{b0}}{P_{ms}} \right) * \left(\frac{V_1}{V_2} \right) * 100 \quad (4)$$

Dónde: V_1 y V_2 corresponden al volumen de filtrado alcalino total y volumen de alícuota utilizada en la prueba. El porcentaje de gamma celulosa (% γ .cel) se obtuvo restando de 100 %, los valores de (% α .cel) y (% β .cel):

$$\% \gamma.cel = 100 - \% \alpha.cel - \% \beta.cel \quad (5)$$

Elaboración del papel: 100 gramos de fibra cocida fueron licuados con agua potable hasta alcanzar un volumen total de 2600 mL, por un tiempo de 15 min con el objeto de realizar el desfibrado de las fibras. Posteriormente, se adicionaron 500 mL de una solución de carboximetilcelulosa (CMC) preparada al 2.5 % p/v, 1800 mL de mucílago (gel usado como floculante obtenido a partir de *Opuntia ficus-indica*) y agua, homogenizando mediante agitación manual. Finalmente, se fabricó el papel haciendo uso de marcos de madera provistos de una malla metálica, que deja escapar el exceso de agua y retiene las fibras. El secado fue realizado a temperatura ambiente sobre una superficie lisa y absorbente.

Control de calidad del papel elaborado: Se determinaron las siguientes propiedades, utilizando normas técnicas ecuatorianas del Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN): pH INEN 1418, humedad INEN 1397, número de Kappa y lignina residual INEN-ISO 302. La

determinación del Gramaje se realizó según la norma INEN 1398, acondicionando las muestras de acuerdo con la norma INEN 1396: atmósfera acondicionada a 23 °C $\pm$ 2 y humedad relativa 50% $\pm$ 2.

Las medidas de la resistencia a la explosión, se realizaron en el Laboratorio de envase y embalaje de la Escuela Politécnica Nacional de Quito, siguiendo la norma TAPPI T 403 ts-63, realizando el acondicionamiento del papel según la norma TAPPI T 402. Para la determinación del contenido de cenizas se utilizó la norma TAPPI T211 om-93. El contenido de SiO₂ se determinó a partir de las cenizas de cada muestra de papel artesanal elaborado con una pistola de fluorescencia de rayos X, modelo TURBO S1 de la marca BRUKER.

El gramaje se define como la masa de una unidad de área de papel o cartón determinada por un método de ensayo normalizado. La medida de pH se realiza por medio de un pH-metro, en un extracto acuoso donde está suspendido el papel cortado en trozos pequeños. El volumen específico (V_{ep}) del papel en cm³/g se calculó dividiendo el espesor (en mm) entre el gramaje de la hoja (g/m²) aplicando la ecuación (6):

$$\text{Volumen específico del papel} = V_{ep} = \left(\frac{cm^3}{g} \right) = \frac{\text{espesor}}{\text{gramaje}} * 1000 \quad (6)$$

Análisis Multicriterio: El Análisis Multicriterio consiste en la evaluación de una serie de alternativas basándose en diferentes criterios. Un método de evaluación multicriterio puede servir para inventariar, clasificar, analizar y ordenar convenientemente una serie de alternativas, a partir de los criterios que se hayan considerado pertinentes en la evaluación. Se parte de una serie de alternativas definidas y una serie de criterios que se consideran pertinentes para evaluarlas y se confecciona una matriz de evaluación en la que se asigna una puntuación a cada alternativa según cada criterio (Gómez *et al.*, 2006).

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En la Tabla 2 se muestra el análisis de las fracciones extraídas en las especies estudiadas. A partir de los valores mostrados se pueden hacer las siguientes observaciones:

- 1) El porcentaje de humedad de la planta (% H_p) varía entre 78 y 32 %, de forma general, se observa que las plantas con mayor humedad tienen un menor rendimiento en fibras (% R_f).

- 2) El rendimiento en fibra se determina después de la extracción mecánica de la fibra. Las especies *Guadua angustifolia* y *Saccharum sinense* tienen los mayores valores de $\%R_f$ (42 y 33 %, respectivamente), por lo cual se debería esperar un mayor rendimiento en la producción de papel.
- 3) Los valores del rendimiento después de cocción ($\%R_{gc}$) son menores comparados con los valores del $\%R_f$, debido a los componentes eliminados en el tratamiento con NaOH. Para algunas especies hay una relación directamente proporcional entre los dos porcentajes de rendimiento, sin embargo, en algunos casos no existe una tendencia definida, por ejemplo, la especie *Guadua angustifolia*, con 42 $\%R_f$ tiene 14 $\%R_{gc}$, este valor es igual al obtenido con las especies *Andropogon gayanus* (22 $\%R_f$) y *Arundo donax* (29 $\%R_f$) con menor valor de $\%R_f$ debido a que la cantidad de componentes solubles en NaOH puede variar con la especie. La especie *Hibiscus rosa-sinensis* presentó el mayor valor de $\%R_{gc}$ (16 %), y las especies *Agave*, *Lavatera arborea* y *Yucca guatemalensis* los menores valores de este parámetro. La cantidad de pulpa a procesar es proporcional al rendimiento después de cocción, por lo que este parámetro se considera como uno de los criterios para la selección de las especies más adecuadas en la elaboración del papel.
- 4) La cantidad de material soluble en etanol-benceno ($\%S_{E-B}$), está alrededor de 10 % para la mayor parte de las plantas analizadas. Los materiales extraíbles pueden considerarse constituyentes no estructurales y generalmente representan una fracción menor en la planta. Los extractivos comprenden componentes inorgánicos y orgánicos que contribuyen a las propiedades de la planta, como el color, el olor y el sabor (Yang & Jaakkola, 2012).
- 5) En cuanto al contenido de celulosa total ($\%C_t$), las especies de la familia Malvaceae: *Alcea rosea*, *Hibiscus rosa-sinensis*, *Lavatera arborea* y *Sida poeppigiana* presentaron porcentajes de celulosa ± 50 % comparable con el contenido de celulosa de árboles de fibras leñosas, como *Ailanthus altissima* y *Eucalyptus globulus* (Ferreira et al., 2013).

El contenido de celulosa es un parámetro importante para la elección de fibras adecuadas en la elaboración del papel. Se han reportado usos específicos de las especies estudiadas en el presente trabajo, por ejemplo, la especie *Sida rhombifolia* con el menor porcentaje de celulosa (33 %) permite elaborar muy buen papel para billetes y notas bancarias (Luna, 1977). La especie *Arundo donax* con el mayor valor de % de celulosa (54 %) se ha estudiado para la elaboración de papel (Shatalov & Pereira, 2005) y además como fibra para combinar con

Tabla 2. Análisis de las fracciones extraídas en las especies estudiadas

Nombre científico	$\%R_f$	$\%H_p$	$\%S_{E-B}$	$\%C_t$	$\%R_{gc}$
<i>Agave americana</i>	4	77	10	24	2
<i>Agave americana</i> var. <i>marginata</i>	5	78	12	46	2
<i>Alcea rosea</i>	14	62	12	52	9
<i>Andropogon gayanus</i>	22	63	10	49	14
<i>Arundo donax</i>	29	50	6	54	14
<i>Cortaderia jubata</i>	22	57	8	16	13
<i>Guadua angustifolia</i>	42	32	5	46	14
<i>Hibiscus rosa-sinensis</i>	28	58	6	56	16
<i>Lavatera arborea</i>	18	41	13	50	5
<i>Linum usitatissimum</i>	17	75	7	59	12
<i>Saccharum sinense</i>	33	32	7	46	11
<i>Saccharum officinarum</i>	18	57	10	43	10
<i>Sida poeppigiana</i>	17	50	5	58	8
<i>Sida rhombifolia</i>	17	56	3	33	9
<i>Yucca guatemalensis</i>	9	63	10	38	5

mezclas de asfalto caliente (Karahancer *et al.*, 2016). *Guadua angustifolia*, procedente de la región Amazónica de Ecuador (Provincia de Pastaza), se ha usado para la elaboración de papel artesanal (Chiluiza & Hernández, 2009) y para reforzamiento de matrices poliméricas (Luna *et al.*, 2016).

El análisis de la celulosa obtenida para cada especie se muestra en la Tabla 3. El contenido de α -celulosa de las especies, es comparable con los valores reportados en trabajos previos sobre elaboración de papel con plantas no leñosas de la familia Fabaceae, *Astragalus armatus* (Moussaoui *et al.*, 2011), *Chamaecytisus proliferus* (López *et al.*, 2004); herbáceas de la familia Thypaceae (Sawar *et al.*, 2007) y de la familia Brassicaceae (Mazhari *et al.*, 2013).

PROPIEDADES DEL PAPEL ELABORADO

La Tabla 4 resume las principales características del papel elaborado a partir de las fibras extraídas de las plantas estudiadas. Los resultados de humedad (% humedad) en el papel elaborado varían entre 7 y 11 %, y se encuentran dentro del intervalo reportado en la bibliografía. La humedad en el papel afecta propiedades tales como impresión, encogimiento, combado y resistencia física (Casey, 1990). En las hojas elaboradas no se observó encogimiento, resultando adecuadas para usos manuales e impresión.

Los valores de pH oscilan entre 7.3 a 9. Existe un interés creciente en los papeles con pH alcalino para usos que requieren permanencia y durabilidad, además

de degradarse más rápido creando menores problemas ambientales.

Los valores de espesor de las hojas de papel artesanal elaboradas varían entre 0.29 y 0.57 mm, con valores de gramaje entre 61 y 146 g/m². Existe una variedad de papeles con espesor entre 0.06 y 0.59 mm con valores de gramaje entre 22-25 g/m² para papel de cigarrillos y de 120 a 300 g/m² para cartón. Ocho de las quince especies estudiadas producen hojas de papel con gramajes > de 100 g/m² y espesor entre 0.29 y 0.57 mm, estas características podrían ubicar al papel elaborado como un papel artesanal para trazados, que puede usarse en la elaboración de tarjetas, pinturas y obras decorativas. El amplio intervalo de gramaje en el papel elaborado, puede ser debido a la variedad de plantas usadas.

Los valores de volumen específico del papel elaborado están en el intervalo 2.64 – 5.63 cm³/g, estos valores son altos comparados con valores reportados en la bibliografía, ya que en cada caso se trata de diferentes materias primas, o bien, de diferentes procesos de producción. Para un gramaje fijo el volumen es proporcional al espesor del papel, en el presente estudio los papeles elaborados tienen variados espesores y gramajes, y no parece haber una correlación definida entre estos dos parámetros. Por ejemplo, el papel obtenido a partir de *Sida poeppigiana* con el menor espesor (0.28 mm) tiene un valor de gramaje comparable con el papel de mayor espesor (0.57 mm) obtenido a partir de *Guadua angustifolia*.

La lignina es uno de los biopolímeros más abundantes en las plantas y junto con la celulosa y la hemicelu-

Tabla 3. Análisis de la celulosa extraída en las especies estudiadas

Nombre científico	α -celulosa total	β -celulosa total	γ -celulosa total
<i>Agave americana</i>	19.2	4.56	0.24
<i>Agave americana</i> var. <i>marginata</i>	36.8	1.38	7.82
<i>Alcea rosea</i>	37.96	3.64	10.4
<i>Andropogon gayanus</i>	32.83	2.45	13.72
<i>Arundo donax</i>	44.82	2.7	6.48
<i>Cortaderia jubata</i>	11.36	0.8	3.84
<i>Guadua angustifolia</i>	36.8	7.36	1.84
<i>Hibiscus rosa-sinensis</i>	45.36	3.92	6.72
<i>Lavatera arborea</i>	41	7.5	1.5
<i>Linum usitatissimum</i>	49.56	4.13	5.31
<i>Saccharum sinense</i>	34.96	2.76	8.28
<i>Saccharum officinarum</i>	33.54	2.15	7.31
<i>Sida poeppigiana</i>	48.14	5.22	4.64
<i>Sida rhombifolia</i>	25.74	2.31	4.95
<i>Yucca guatemalensis</i>	31.92	4.94	1.14

losa conforma la pared celular de las mismas. La composición o distribución de los tres componentes en esas redes varía dependiendo del tipo de planta. El número de kappa, N° Kappa, es una medida directamente proporcional al contenido de lignina en la pulpa (Saijonkari, 2001). Este número representa el volumen de solución de KMnO_4 0.1N consumido por 1 g de pulpa. Los valores del número de Kappa entre 12-18 y de lignina residual entre 1.54-2.31 (Tabla 4), mostraron poca variación y fueron menores a los reportados para pulpas obtenidas a partir de fibras de madera (Chávez & Domine, 2013).

El porcentaje de cenizas entre 0.78-2.69, representa el contenido de relleno en el papel. Es una propiedad poco importante del papel, algunos tipos de papeles como los papeles de filtro no contienen cenizas y otros como el papel de cigarrillos, tienen cierto nivel de carga para controlar la velocidad de combustión del cigarrillo. El porcentaje de sílice (SiO_2) determinado en las cenizas del papel elaborado, está entre 4.3 y 20.5 %p, un valor relativamente alto, debido a que las plantas no leñosas se caracterizan por tener un alto contenido de sílice entre 0.5 % –5 %, en relación con la madera a me-

nos de 0.1 % (Biermann, 1996). La sílice causa problemas en la elaboración y en la calidad del papel para impresión (Bajpai, 2017).

La resistencia a la explosión es la resistencia que ofrece una hoja a ser rota por una fuerza no puntual, cuyo vector es perpendicular a su plano (Nuñez, 2005). Los valores de resistencia a la explosión varían en un amplio intervalo 0.63-27.50 lbf/pulg², como se puede observar en la Tabla 5. Este parámetro es muy importante, ya que indica la resistencia del papel y la cohesión de las fibras que lo constituyen. Representa cuánta presión puede soportar el papel antes de romperse, es particularmente importante para papeles destinados a la manufactura de bolsas.

Un parámetro comúnmente reportado es el índice de explosión, definido como la resistencia a la explosión en kPa, dividido entre el gramaje del papel en g/m². A fin de comparar con los valores reportados en otros trabajos. En la tabla 5 se muestran los valores de resistencia a la explosión medidos en lbf/pulg², y convertidos a kPa para calcular el índice de explosión en las unidades $\text{kPa} \cdot \text{m}^2 / \text{g}$.

Tabla 4. Propiedades del papel elaborado con las especies estudiadas

Especie	% humedad	pH	Espesor mm	Gramaje (g/m ²)	V _{sp} (cm ³ /g)	N° Kappa	Lignina residual (%)	Cenizas (%)	% SiO ₂
<i>Agave americana</i>	8	8,50	0.41	82	5.00	15	1,89	2,24	12,8
<i>Agave americana</i> var. <i>marginata</i>	8	8,30	0.31	61	5.08	12	1,54	1,89	5,65
<i>Alcea rosea</i>	11	7,90	0.32	89	3.60	16	2,09	1,92	5,49
<i>Andropogon gayanus</i>	11	7,30	0.38	125	3.04	14	1,88	0,78	7,43
<i>Arundo donax</i>	10	7,90	0.48	123	3.90	16	2,02	1,13	6,05
<i>Cortaderia jubata</i>	10	7,30	0.54	146	3.70	14	1,86	1,28	20,5
<i>Guadua angustifolia</i>	7	8,60	0.57	114	5.00	18	2,31	1,30	8,61
<i>Hibiscus rosa-sinensis</i>	9	7,40	0.51	111	4.59	14	1,84	1,05	6,10
<i>Lavatera arborea</i>	7	8,90	0.47	103	4.56	17	2,27	1,07	6,80
<i>Linum usitatissimum</i>	10	8,10	0.45	80	5.63	16	2,04	1,10	6,30
<i>Saccharum sinense</i>	7	8,70	0.37	121	3.06	15	1,99	0,99	10,1
<i>Saccharum officinarum</i>	10	7,50	0.29	94	3.09	15	1,89	1,21	7,29
<i>Sida poeppigiana</i>	10	7,80	0.29	110	2.64	15	1,92	2,26	3,07
<i>Sida rhombifolia</i>	7	9,00	0.47	106	4.43	16	2,14	2,26	4,3
<i>Yucca guatemalensis</i>	8	7,80	0.28	76	3.68	13	1,71	2,69	7,21

Tabla 5. Valores medidos de la resistencia a la explosión en (lbf/pulg²), y valores calculados de la resistencia a la explosión en kPa y el índice de explosión en kPa*m² / g

Especie	Resistencia a la explosión (lbf/pulg ²)	Resistencia a la explosión (kPa)	Índice de explosión (kPa*m ² / g)
<i>Agave americana</i>	18,25±3.25	125.83	1.53
<i>Agave americana</i> var. <i>marginata</i>	20,75±2.91	143.07	2.35
<i>Alcea rosea</i>	27,50±5.60	189.61	2.13
<i>Andropogon gayanus</i>	2,73±0.97	18.82	0.15
<i>Arundo donax</i>	0,63±0.15	4.34	0.04
<i>Cortaderia jubata</i>	2,31±0.72	15.93	0.11
<i>Guadua angustifolia</i>	2,62±0.89	18.06	0.16
<i>Hibiscus rosa-sinensis</i>	3,00±0.81	20.68	0.19
<i>Lavatera arborea</i>	6,04±1.05	41.64	0.40
<i>Linum usitatissimum</i>	3,32±0.76	22.89	0.29
<i>Saccharum sinense</i>	13,29±2.13	91.63	0.76
<i>Saccharum officinarum</i>	23,92±7.13	164.92	1.75
<i>Sida poeppigiana</i>	2,63± 0.94	18.13	0.16
<i>Sida rhombifolia</i>	7,15±1.13	49.30	0.47
<i>Yucca guatemalensis</i>	3,57±1.07	24.61	0.32

A efectos de comparación, en la Tabla 6, se muestran valores reportados en la bibliografía para algunos de los parámetros determinados en este estudio. En el caso del índice de explosión, once especies de las plantas estudiadas en el presente trabajo, producen un papel con índice de explosión entre 0.04 y 0.76, comparables a los valores reportados por Chiluiza y Hernández (2009). Benítez *et al.* (2019) obtienen un valor mayor del índice de explosión para papel artesanal a partir de Bamboo

(*Guadua angustifolia*), debido probablemente a diferencias en el tratamiento alcalino. Las hojas de papel producidas a partir de las especies *Agave*, *Alcea rosea* y *Saccharum officinarum* tienen índice de explosión entre 1.53-1.75 kPa*m² / g comparables con los reportados. Plantas monocotiledóneas como *Saccharum officinarum*, poseen fibra que se deriva del tejido vascular, la cual proporciona resistencia al papel fabricado a partir de ella (Biermann, 1996).

Tabla 6. Algunas propiedades del papel reportados en referencias bibliográficas

Materia prima- Referencia	Parámetro determinado			
	Gramaje (g/m ²)	Volumen específico (cm ³ /g)	Espesor, mm	Índice de explosión, kPa*m ² / g
<i>Guadua angustifolia</i> (Chiluiza & Hernández, 2009)	77.96-103.84	2.81-3.04	0.24-0.29	0.11-0.90
<i>Guadua angustifolia</i> (Benítez <i>et al.</i> , 2019)	57.6	---	---	0.87
<i>Astragalus armatus</i> (Moussaoui <i>et al.</i> , 2011)	58.2	2.57	0.15	2.54
<i>Cynara cardunculus</i> (Antunes <i>et al.</i> , 2003)	61.4	1.56	---	1.64
<i>Ailantus altissima</i> (<i>Ailanthus altissimus</i>) (Ferreira <i>et al.</i> , 2013)	63.6	1.42-1.99	---	1.42-1.99
<i>Arundo donax</i> (Shatalov & Pereira, 2005)	---	1.31-1.96	---	1.31-1.96
<i>Brassica napus</i> (Mazhari <i>et al.</i> , 2013)	---	1.39-1.72	---	1.36-3.84
<i>Musa paradisiaca</i> (Sosa <i>et al.</i> , 2011)	---	----	---	6

ANÁLISIS MULTICRITERIO

Para el análisis multicriterio se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones:

- 1) *Alternativas a considerar*: Las 15 especies de plantas analizadas.
- 2) *Criterios de evaluación seleccionados*: Porcentaje de rendimiento después de cocción ($\%R_{gc}$); los porcentajes de alfa-celulosa; gamma celulosa y beta celulosa ($\% \alpha$ -celulosa; $\% \gamma$ -celulosa; $\% \beta$ -celulosa); el % de lignina, % de sílice y la resistencia a la explosión ($R_{explosión}$).
- 3) *Influencia de los criterios*: Se considera de modo cualitativo que los criterios seleccionados pueden influir positiva o negativamente en la selección de la alternativa. La influencia es positiva cuando el mayor valor del parámetro contribuye a la selección de la alternativa, por ejemplo, los mayores valores de $\%R_{gc}$ y de los porcentajes de α y γ -celulosa, indican mayor cantidad de celulosa aprovechable para la producción del papel. Por el lado de los parámetros relacionados con la calidad del papel, la resistencia a la explosión se consideró un parámetro con influencia positiva, ya que a mayor valor se tiene un papel más resistente. Por el contrario, los criterios con influencia negativa están representados por parámetros que al aumentar su valor hacen que la alternativa sea menos favorable. En relación con la calidad de la pulpa, al aumentar el valor de % de β -celulosa, se pierde rendimiento en celulosa aprovechable, ya que este componente de la celulosa proviene de la degradación de la α -celulosa. Los criterios considerados con influencia negativa atribuidos a la calidad del papel, fueron el % de lignina y el % de SiO_2 , debido a que un mayor valor de estos parámetros indica menor calidad del papel. En la Tabla 7, se resumen los valores de los parámetros seleccionados para el análisis multicriterio.
- 4) *Método de decisión multicriterio*: Se utilizó el método de ponderación lineal, uno de los más conocidos y utilizados comúnmente. Con este método se obtiene una puntuación global por la suma de las contribuciones de cada criterio (Berumen & Llamazares, 2007).

Si se tienen varios criterios con diferentes escalas (dado que ellos no se pueden sumar directamente), se requiere un proceso previo de normalización para que pueda efectuarse la suma de las contribuciones de cada uno de ellos. Para evaluar la contribución de los parámetros seleccionados, esto es la Función de utilidad (F.u), se esta-

bleció una escala lineal entre el valor máximo y el valor mínimo de cada parámetro, entre los límites de 1 y 0 (cero). En el caso de los parámetros que influyen positivamente $\%R_{gc}$, $\% \alpha$ -celulosa, $\% \gamma$ -celulosa y $R_{explosión}$, se le asignó al valor máximo de cada parámetro el límite de 1 y para el valor mínimo el límite de 0 (cero). Para los parámetros que influyen negativamente se realizó la asignación contraria, es decir, al valor mínimo se le asignó el límite de 1 y al máximo el límite de cero (0). Realizando estas asignaciones se determinó una línea recta con el par de valores máximo y mínimo, y así llevar los valores medidos de los parámetros a la escala lineal establecida. En la Tabla 8, se muestran los valores máximos y mínimos de cada parámetro y la ecuación lineal establecida con este par de valores.

En la Tabla 9, se muestran los valores de las contribuciones o función de utilidad de cada criterio seleccionado para el análisis, acotado entre 1 y 0 (cero). Como se puede ver en esta tabla, para cada parámetro el valor máximo de la función (igual a 1.00) corresponde en cada caso a una especie diferente. Por ejemplo, la mayor $R_{explosión}$ corresponde al papel hecho con fibra de *Alcea rosea*, que indica buena calidad del papel. En tanto que el mayor rendimiento después de cocción, $\%R_{gc}$ es para la especie *Hibiscus rosa-sinensis*, que dará entonces el mayor rendimiento en cantidad de papel.

En el análisis multicriterio se determinó el valor promedio de la función de utilidad tomando en cuenta dos ponderaciones. En la primera, se consideró que todos los parámetros tenían igual peso, lo cual equivale a tomar un valor promedio. Para la segunda se determinaron factores de ponderación, empleando el método de análisis jerárquico AHP (Bhushan & Rai, 2004). En la matriz de comparación por pares, se asignó un valor de 3 para la Resistencia a la explosión $R_{explosión}$ considerando este parámetro ligeramente más importante que el resto, mientras que, los demás parámetros fueron considerados igualmente importantes. Se calcula la función promedio considerando las ponderaciones asignadas (w_i) para cada contribución de un criterio en particular ($(f.u)_i$). Para igual ponderación, $w_i = 1/7$ y con diferente ponderación $w_i = 1/3$ para $R_{explosión}$ y $1/9$ para el resto de los parámetros.

$$\overline{f.u} = \sum_{i=1}^7 w_i (f.u)_i \quad (7)$$

En la Figura 1 se representa la función de utilidad para cada especie evaluada tomando en cuenta las dos ponderaciones utilizadas. El máximo valor que puede tomar la función de utilidad es 1, para una especie que

Tabla 7. Valores de los parámetros seleccionados para el análisis multicriterio

Nombre científico	Criterios aplicados para el análisis multicriterio						
	%R _{gc}	% α-celulosa	%γ-celulosa	Resistencia a la explosión (lbf/pulg ²)	% lignina	% β-celulosa	% sílice
<i>Agave americana</i>	2	19.2	0.24	18.25	1.89	4.56	12.8
<i>Agave americana</i> var. <i>marginata</i>	2	36.8	7.82	20.75	1.54	1.38	5.65
<i>Alcea rosea</i>	9	37.96	10.4	27.5	2.09	3.64	5.49
<i>Andropogon gayanus</i>	14	32.83	13.72	2.73	1.88	2.45	7.43
<i>Arundo donax</i>	14	44.82	6.48	0.63	2.02	2.7	6.05
<i>Cortadeira jubata</i>	13	11.52	3.84	2.31	1.86	0.64	20.5
<i>Guadua angustifolia</i>	14	36.8	1.84	2.62	2.31	7.36	8.61
<i>Hibiscus rosa-sinensis</i>	16	45.36	6.72	3	1.84	3.92	6.1
<i>Lavatera arborea</i>	5	41	1.5	6.04	2.27	7.5	6.8
<i>Linum usitatissimum</i>	12	49.56	5.9	3.32	2.04	3.54	6.3
<i>Saccharum sinense</i>	11	34.96	8.28	13.29	1.99	2.76	10.1
<i>Saccharum officinarum</i>	10	33.54	7.31	23.92	1.89	2.15	7.29
<i>Sida poeppigiana</i>	8	48.14	4.64	2.63	1.92	5.22	3.07
<i>Sida rhombifolia</i>	9	25.74	4.95	7.15	2.14	2.31	4.3
<i>Yucca guatemalensis</i>	5	31.92	1.14	3.57	1.71	4.94	7.21

Tabla 8. Valores máximo y mínimo y función lineal para los parámetros del análisis multicriterio

Criterio	Valor máximo	Valor mínimo	Ecuación lineal (F.u)
%R _{gc}	16	2	F.u = 0.0714*(%R _{gc})-0.1429
% α-celulosa	49.56	11.52	F.u = 0.0263*(%α-celulosa)-0.3028
% γ-celulosa	13.72	0.24	F.u= 0.0742*(%γ-celulosa)-0.0178
% β-celulosa	7.50	0.64	F.u= 1.0933 – 0.1458*(%β-celulosa)
Lignina	2.31	1.54	F.u= 3 - 1.2987*(%Lignina)
R _{explosión}	27.50	0.63	F.u= 0.0372*(R _{explosión})-0.0234
% SiO ₂	20.5	3.07	F.u= 1.1761 – 0.0574*(%SiO ₂)

Tabla 9. Valores de la Función de utilidad de los parámetros seleccionados para análisis multicriterio

	%Rgc	% α-cel	%γ-cel	R exp	Lignina	% β-cel	% SiO ₂
<i>Agave americana</i>	0.00	0.20	0.00	0.66	0.55	0.43	0.44
<i>Agave americana</i> var. <i>marginata</i>	0.00	0.67	0.56	0.75	1.00	0.89	0.85
<i>Alcea rosea</i>	0.50	0.70	0.75	1.00	0.29	0.56	0.86
<i>Andropogon gayanus</i>	0.86	0.56	1.00	0.08	0.56	0.74	0.75
<i>Arundo donax</i>	0.86	0.88	0.46	0.00	0.38	0.70	0.83
<i>Cortadeira jubata</i>	0.79	0.00	0.27	0.06	0.58	1.00	0.00
<i>Guadua angustifolia</i>	0.86	0.67	0.12	0.07	0.00	0.02	0.68
<i>Hibiscus rosa-sinensis</i>	1.00	0.89	0.48	0.09	0.61	0.52	0.83
<i>Lavatera arborea</i>	0.21	0.78	0.09	0.20	0.05	0.00	0.79
<i>Linum usitatissimum</i>	0.71	1.00	0.42	0.10	0.35	0.58	0.81
<i>Saccharum sinense</i>	0.64	0.62	0.60	0.47	0.42	0.69	0.60
<i>Saccharum officinarum</i>	0.57	0.58	0.52	0.87	0.55	0.78	0.76
<i>Sida poeppigiana</i>	0.43	0.96	0.33	0.07	0.51	0.33	1.00
<i>Sida rhombifolia</i>	0.50	0.37	0.35	0.24	0.22	0.76	0.93
<i>Yucca guatemalensis</i>	0.21	0.54	0.07	0.11	0.78	0.37	0.76

posea los máximos criterios con influencia positiva y los mínimos criterios con influencia negativa. Como se ve en la Figura 1, para las dos ponderaciones las especies *Alcea rosea*, *Saccharum officinarum* y *Agave americana* var. *Marginata*, tienen los mayores valores de la función de utilidad muy similares entre sí, por lo que se pueden tomar como las tres especies no leñosas más adecuadas para la manufactura del papel artesanal.

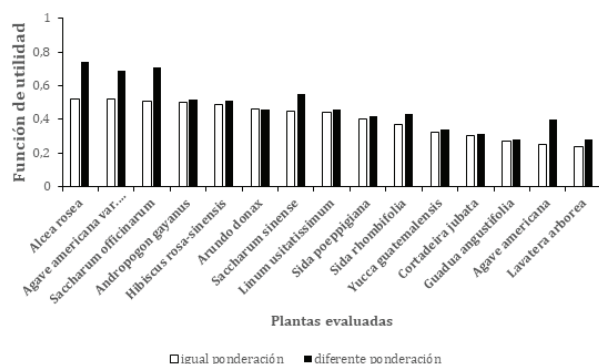


Figura 1. Función de utilidad para las especies estudiadas

CONCLUSIONES

El trabajo realizado aporta el análisis de 15 plantas no leñosas abundantes y de fácil cultivo en la región sur de Ecuador. Las fibras extraídas de las plantas presentan propiedades variables: el contenido de celulosa está entre 59 y 16 %, con mayor fracción de alfa celulosa (50-11 %) comparada con beta (8-1 %) y gamma celulosa (14-0.2 %) y bajo contenido de lignina (< 3 %). El componente principal de las plantas para uso como materia prima en la fabricación de papel es la celulosa, aunque el contenido de este componente es variable, se comprueba que es factible técnicamente la producción de papel artesanal a partir de ellas. Para completar el estudio se requiere un análisis económico preliminar.

El papel obtenido a partir de las fibras de las especies estudiadas, tiene propiedades aceptables de acuerdo con el control de calidad realizado. Ocho de las quince especies estudiadas producen hojas de papel con gramajes > de 100 g/m² y espesor entre 0.29 y 0.57 mm, estas características podrían ubicar al papel elaborado como un papel artesanal para trazados, que puede usarse en la elaboración de tarjetas, pinturas y obras decorativas. La variedad de propiedades del papel, principalmente en cuanto a gramaje puede ser atribuida a que se aplicó un mismo procedimiento a una amplia variedad de plantas.

Los parámetros seleccionados para el análisis multicriterio estuvieron basados en la cantidad y calidad del

papel a obtener. La escala lineal establecida con un valor unitario para el máximo y cero para el mínimo en los parámetros favorables, y viceversa para los desfavorables, permite hacer una ponderación equitativa de los criterios asignados.

Las especies que representan mejores alternativas para la fabricación de papel artesanal fueron *Alcea rosea*, *Saccharum officinarum*, y *Agave americana* var. *marginata*. Las fibras obtenidas a partir de estas especies podrían considerarse como alternativas para satisfacer un posible déficit de fibra de madera en la fabricación de papel.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Señor Bolívar Merino, curador del Herbario Loja de la Universidad Nacional de Loja, por la identificación de las especies vegetales. A la Universidad Técnica Particular de Loja por el soporte financiero. Al Sr. Germán Romo y al Ing. Oswaldo Acuña de la Escuela Politécnica Nacional (Quito).

REFERENCIAS

- Aguilar, S., Ramírez, J. & Malagón, O. (2007). Extracción de fibras no leñosas: cabuya (*Furcraea andina* Trel.) y banano (*Musa paradisiaca* L.) para estandarizar un proceso tecnológico destinado a la elaboración de pulpa y papel. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 8, 89-98.
- Alila, S., Besbes, I., Rei Vilar, M., Mutjé, P. & Boufi, S. (2013). Non-woody plants as raw materials for production of microfibrillated cellulose (MFC): A comparative study. *Industrial Crops and Products*, 41, 250-259. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.04.028>
- Antunes, A., Amaral, M., Naceur, B. & Silvy, J. (2003). Pulp and paper properties from *Cynara Cardunculus* L. *Cellulose Chemistry and Technology*, 37, 239-248.
- Ashori, A. (2006). Nonwood fibers: A potential source of raw material in papermaking. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 45, 1133-1136. <https://doi.org/10.1080/03602550600728976>
- Bajpai, P. (2017). *Pulp and paper industry: emerging waste water treatment technologies*. Amsterdam: Editorial Elsevier Science.
- Benítez, J., Popa, M., Vallejos, M. & Area, M. (2019). Calidad de papel artesanal de fibras no convencionales de cinco especies colombianas. *Revista de Ciencia y Tecnología*, 31, 28-35.
- Berumen, S. & Llamazares, F. (2007). La utilidad de los métodos de decisión multi criterio (como el AHP) en un entorno de competitividad creciente. *Cuadernos de Administración*, 20(34), 65-87. Recuperado de <http://www.scielo.org.co/pdf/cadm/v20n34/v20n34a04.pdf>
- Bettenfeld, P., Fontaine, F., Trouvelot, S., Fernández, O. & Country, P.-E. (2020). Woody plant declines. What's wrong with the mi-

- crobiome. *Trends in Plant Science*, 25, 381-394. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2019.12.024>
- Bhushan, N. & Rai, K. (2004). *Strategic decision making applying the analytic hierarchy process*. Berlín, Alemania: Springer.
- Biermann, C. (1996). *Handbook of pulping and papermaking*. 2a ed. Washington USA: Academic Press.
- Bormaud, A., Mérotte, J., Siniscalco, D., Le Gall, M., Gager, V., Le Duigou, A. & Baley, C. (2019). Main criteria of sustainable natural fibre for efficient unidirectional biocomposites. *Composites, Part A*, 124, Article 105504. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2019.100301>
- Bull, G., Mabee, W. & Scharpenberg, R. (1999). *Modelo de suministro mundial de fibras*. Roma: FAO. Recuperado de <http://fao.org/3/a-x0105s.pdf>
- Casey, J. (1990). *Pulpa y papel: química y tecnología química*. México: Limusa.
- Chávez-Sifontes, M. & Domine, M. (2013). Lignina, estructura y aplicaciones: métodos de despolimerización para la obtención de derivados aromáticos de interés industrial. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 4, 15-46. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=323629266003>
- Chiluiza, C. & Hernández, J. (2009). *Elaboración de papel artesanal de caña guadua (Guadua Angustifolia K.)*. Quito (Ecuador): Escuela Politécnica Nacional. Recuperado de <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/1901>
- Deuydt, D., Billington, L., Fuentes, C., Sweygers, N., Dupont, C., Appels, L., & van Vuure, A. (2019). European bamboo fibres for composite applications, study on the seasonal influence. *Industrial Crops & Products*, 133, 304-316. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.03.026>
- Emerton, H. (1965). Composition and structure of papermaking and the effect on these of the beating process. En E. b. Bolan, *Stuff preparation for paper and paperboard making*, Frankfurt: Pergamon-Press, pp 10-41.
- Eriksen, O., Syverud, K. & Gregersen, O. (2008). The use of microfibrillated cellulose produced from kraft pulp as strength enhancer in TMP paper. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, 23, 299-304. <https://doi.org/10.3183/npprj-2008-23-03-p299-304>
- Escoto-García, T., Rodríguez-Rivas, A., Murillo-Vásquez, R., Anzaldo-Hernández, J. & Rivera-Prado, J. (2015). Obtención de celulosa blanqueada de Ricinus communis L. mezclada con fibra industrial para fabricar papel bond. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 6(28), 106-125.
- Escoto-García, T., Vivanco-Castellanos, E., Lomelí-Ramírez, M. & Arias-García, A. (2006). Tratamiento fermentativo -químico-mecánico del bagazo de caña (Agave tequilana weber) para su aplicación en papel hecho a mano. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 5, 23-27.
- Ferreira, P., Gamelas, J., Carvalho, M., Duarte, G., Canhoto, J. & Passas, R. (2013). Evaluation of the papermaking potential of Ailanthus altissima. *Industrial Crops and Products*, 42, 538-542. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.06.030>
- García, M., López, F., Alfaro, A., Ariza, J. & Tapias, R. (2008). The use of Tagasaste (Chamaecytisus proliferus) from different origins for biomass and paper production. *Bioresource Technology*, 99, 3451-3457. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.08.004>
- Ghadakpour, M., Janalizadeh, A. & Soleimani, S. (2020). Investigation of the Kenaf fiber hybrid length on the properties of the cement-treated sandy soil. *Transportation Geotechnics*, 22, 100301. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2019.100301>
- Gómez-Delgado, M. & Barredo, J. (2006). *Sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio*. 2a ed. México: Alfaomega Rama.
- Gonzalo, A., Bimbela, F., Labidi, J., Marín, F. & Arauzo, J. (2017). Evaluation of different agricultural residues as raw materials for pulp and paper production using a semichemical process. *Journal of Cleaner Products*, 156, 184-193. <https://doi.org/10.1016/j.clepro.2017.04.036>
- Harris, P. (2017). Nonwood Fibers. En Thomas B., Murray B. & Murphy D., *Encyclopedia of Applied Plant Sciences*. 2a Ed. Amsterdam: Elsevier. Pp. 198-202.
- Jorgensen, P. & León-Yáñez, S. (1999). *Catalogue of the vascular plants of Ecuador*. Missouri: Missouri Botanical Garden Press.
- Karahancer, S. S., Eriskin, E., Sarioglu, O., Capali, B., Saltan, M. & Terzi, S. (2016). Utilization of Arundo donax in Hot Mix Asphalt as a fiber. *Construction and Building Materials*, 125, 981-986. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.147>
- Kaur, D., Bhardwaj, N. & Lohchab, R. (2016). Prospects of rice straw as a raw material for paper making. *Waste Management*, 60, 127-139. <https://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2016.08001>
- López, F., Alfaro, A., García, M., Calero, A. & Ariza, J. (2004). Pulp and Paper from Tagasaste (Chamaecytisus Proliferus L.F. SSP. Palmensis). *Chemical Engineering Research and Design*, 82, 1029-1036. <https://doi.org/10.1205/0263876041580730>
- Luna-Ercilla, C. (1977). *Plantas textiles indígenas*. Buenos Aires (Argentina): Acme.
- Luna, P., Lizarazo-Marriaga, J. & Mariño, A. (2016). Guadua angustifolia bamboo fibers as reinforcement of polymeric matrices: An exploratory study. *Construction and Building Materials*, 116, 93-97. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.139>
- Mannai, F., Ammar, M., Garrido, J., Elaloui, E. & Moussaoui, Y. (2016). Cellulose fiber from Tunisian Barbary Fig "Opuntia ficus-indica" for papermaking. *Cellulose*, 23, 2061-2072.
- Marques, G., Rencoret, J., Gutiérrez, A. & del Río, J. (2010). Evaluation of the chemical composition of different non-woody plant fibers used for pulp and paper manufacturing. *The Open Agriculture Journal*, 4, 93-101. <https://doi.org/10.2174/1874331501004010093>
- Mazhari Mousavi, S., Hoseeini, S., Gamaroodi, E., Mahdavi, S. & Resalati, H. (2013). Papermaking potential of rapeseed straw, a new agricultural-based fiber source. *Journal of Cleaner Production*, 52, 420-424. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.02.016>
- Mazlana, N., Talib, R., Ibrahim, R., Rahman, R. & Zuriyati, A. (2014). Suitability of coir fibers as pulp and paper. *Agriculture and Agricultural Science*, 2, 304-311. <https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2014.11.043>

- Mechi, N., Khiari, R., Ammar, M., Elaloui, E. & Belgacem, M. (2017). Preparation and application of Tunisian phosphogypsum as fillers in papermaking made from *Prunus amygdalus* and *Tamarisk* sp. *Powder Technology*, 312, 287-293. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.02.055>
- Mechi, N., Khiari, R., Elaloui, E. & Belgacem, M. (2016). Preparation of paper sheets from cellulosic fibres obtained from *Punus Amygdalus* and *Tamarisk* SP. *Cellulose Chemistry and Technology*, 50, 863-872.
- Moraes, M., Ollgaard, B., Kvist, L., Borchsenius, F. & Balslev, H. (2006). Las plantas de fibra. En Macía M., *Botánica Económica de los Andes Centrales*. La Paz: Universidad Mayor de San Andrés. Pp. 370-384.
- Moral, A., Aguado, R., Mutjé, P. & Tijero, A. (2016). Papermaking potential of *Citrus sinensis* trimmings using organosolv pulping, chlorine-free bleaching and refining. *Journal of Cleaner Production*, 112, 980-986. <https://doi.org/10.1016/j.clepro.2015.09.008>
- Moussaoui, Y., Ferhi, F., Elimame, S., Salem, R. & Belgacem, M. (2011). Utilisation of *astragalus Armatus* Roots in Papermaking. *BioResources*, 6, 4969-4978.
- Noguera, N., Ojeda, L. & Herrera, H. (2017). La linaza (*Linum usitatissimum* L.) y su papel nutraceutico. *Saber, Universidad de Oriente, Venezuela*, 29, 712-722.
- Núñez, C. E. (2 de 2005). <http://www.unam.edu.ar/procyp.html>. Recuperado de, <http://www.fceqyn.unam.edu.ar>
- Parra, L., Quiñones, P. & Prieto, A. (2010). Extracción de fibras de agave para elaborar papel y artesanías. *Acta Universitaria*, 77-83.
- Puranen, T., Alapuranen, M. & Vehmaanpera, J. (2014). Trichoderma Enzymes for Textile Industries. *Biotechnology and Biology of Trichoderma*, 351-362. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-59576-8.00026-6>
- Saijonkari-Pahkala, K. (30 de 11 de 2001). *Academic Dissertation. Non-wood plants as raw material for pulp and paper*. Helsinki, Finlandia.
- Sawar-Jahan, M., Khalidu-Islam, M., Nasuma-Chowdhury, D., Iqbal-Moeiz, S. & Arman, U. (2007). Pulping and papermaking properties of pati (Typha). *Industrial Crops and Products*, 26, 259-264. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2007.03.014>
- Shatalov, A. & Pereira, H. (2005). Arundo donax L. Reed: new perspectives for pulping and bleaching. Part 4. Peroxide bleaching of organosolv pulps. *Bioresorce Technology*, 96, 865-872. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.09.005>
- Sosa, A., Rivas, J., Mogollón, G., Gutiérrez, I. & Aguilera, A. (2011). Evaluación papelera del pseudotallo de plátano (*Musa paradisiaca*) en formulaciones con *Hevea brasiliensis*, *Eucalyptus urophylla* y *Pinus caribaea* var. *Hondurensis*. *Revista Forestal Venezolana*, 55, 9-16.
- Toppinen, A., Patari, S., Tuppur, A. & Tantunen, A. (2017). The European pulp and paper industry in transition to a bio-economy: A Delphi study. *Futures*, 88, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2017.02.002>
- Yang, G.-Y. & Jaakkola, P. (2012). Semantic Scholar. Recuperado de Semantic Scholar: https://pdfs.semanticscholar.org/8da6/397e7b858c44bf53cf11de9f0b4682c04fa.pdf?_ga=2.204299282.307216280.1585839245-732043794.1576435128
- Zhang, Z., Ortiz, O., Goyal, R. & Kohn, J. (2014). Biodegradable polymers. *Principles of Tissue Engineering*, 441-473. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-398358-9.00023-9>