



Categoría: energía, eficiencia y cambio climático, residuos, tecnología e innovación.

CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA COMO MÉTODO DE PREDICCIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL PAPEL PROCEDENTE DE RESIDUOS AGRÍCOLAS

Moral A.^{1*}, Cabeza E.¹, Aguado R.¹, Tijero A.²

¹ Grupo ECOWAL, Departamento de Biología Molecular e Ingeniería Bioquímica, Universidad Pablo de Olavide, Sevilla. E-mail: amoram.upo.es

² Departamento de Ingeniería Química, Universidad Complutense de Madrid

Resumen

La producción de papel a través de tecnologías respetuosas con el medio ambiente está cobrando gran relevancia en la actualidad. Uno de los aspectos fundamentales a tener en cuenta es la materia prima utilizada. Entre los procesos de producción ecológicamente sostenibles se encuentra el aprovechamiento de residuos agrícolas. Se trata de una fuente de eliminación de ingentes cantidades de residuos que aportan costes a las explotaciones agrarias y deterioros en los sistemas en forma de incendios o plagas.

El presente estudio evalúa la posibilidad de fabricar papel procedente de residuos agrícolas como alternativa a las vías tradicionales con especies madereras, contribuyendo a suplir la tala de árboles.

Para evaluar si el papel es apto para su comercialización, es necesario que sus propiedades mecánicas se encuentren dentro de un intervalo determinado. La medida de estos parámetros se realiza con múltiples equipos de difícil adquisición para laboratorios convencionales debido a su elevado coste. Es por ello que, para favorecer la investigación encaminada a la reutilización de residuos agrícolas, se pretende establecer una correlación entre la caracterización morfológica de las hojas de papel y las propiedades mecánicas del producto final.

El sistema MorFi LB01 es un analizador de morfología de fibras, utilizado principalmente en el análisis de fibras celulósicas, que sigue un método de análisis de imagen. El equipo lleva a cabo un reconocimiento de las fibras, estimando su longitud, anchura, curvatura y retorcimiento. La principal diferencia de este aparato con respecto a otros que también usan el análisis de imagen, es que en este caso el haz de luz es no polarizada, por lo que permite medir con bastante exactitud y precisión las características morfológicas de fibras, finos y vasos, distinguiendo estos tres elementos en función de su tamaño.

Estableciendo correlaciones entre los parámetros morfológicos y las propiedades mecánicas del papel se abre una vía que facilita el estudio, sustituyendo los múltiples equipos empleados para determinación de las propiedades mecánicas por uno de fácil adquisición, contribuyendo al desarrollo de productos sostenibles.

Palabras clave: FBRM, floculación, coagulación, reutilización de aguas, aguas residuales



1. Introducción

El cultivo del arroz, cuya producción continúa en aumento, da lugar a elevadas cantidades de paja de arroz que constituye un residuo agrícola. Los principales constituyentes de este residuo son la celulosa y la lignina, que suponen el 85-90% de los materiales secos, y otros componentes minoritarios como cenizas, azúcares simples, pectinas, etc. El aprovechamiento de los residuos agrícolas puede realizarse separando sus componentes por fraccionamiento para usarlos de manera independiente, o transformándolos sin una separación previa (1-3). La principal vía de aprovechamiento, mediante separación de los componentes consiste en aislar las fibras celulósicas para la fabricación de papel (4,5).

La fabricación de papel implica dos etapas: obtención de pasta y formación de hojas. La obtención de pasta consiste en la transformación de las materias primas en fibras celulósicas aisladas en una suspensión acuosa diluida, mediante la separación de la lignina, que es el agente que, a modo de cemento, aglomera las fibras celulósicas y fija su posición. En la formación de hojas de papel, la pasta, tratada convenientemente para desarrollar algunas propiedades características, se somete a operaciones que tienen por finalidad extenderla en forma de láminas y eliminar la mayor parte de su humedad (6,7).

Tradicionalmente las materias primas empleadas en la fabricación de papel han sido especies vegetales no madereras como el lino, el algodón, la morera, el bambú y la paja de cereales. El aumento de la demanda de papel, así como la escasez de las especies madereras ha llevado a un mayor desarrollo en la utilización de fibras alternativas (8).

Las ventajas de utilizar materias primas alternativas son la disminución de las deforestaciones y replantaciones, la reducción de las importaciones de madera o pastas celulósicas en aquellos países con déficit de materias primas madereras así como el aumento del interés del consumidor por disponer de papeles obtenidos mediante tecnologías limpias, procedentes de fibras recicladas o de materias primas alternativas (9-11).

La búsqueda de tecnologías más respetuosas con el medio ambiente debe incluir, además de usar materias primas alternativas a la madera, la utilización de procesos de pasteado menos contaminantes y el aprovechamiento de las otras fracciones de las materias primas (12-15). Es posible lograr esto utilizando pretratamientos como los hidrotérmicos, que permitan separar hemicelulosas que pueden dar lugar a diversos productos (aditivos alimentarios, fármacos, azúcares, etanol, xilitol, furfural, etc.); procesos de pasteado que no utilicen azufre como los procesos a la sosa y los que utilizan disolventes orgánicos para la extracción de la lignina (16-20). De esta manera se mejora el rendimiento y economía del proceso global y se preserva el medio ambiente, con la consiguiente repercusión ecológica favorable (21).

El objetivo general del presente trabajo es la búsqueda de correlaciones entre la caracterización morfológica de las fibras procedentes de paja de arroz sometidas a distintas condiciones de cocción con etanolamina y las propiedades de la pasta y hojas de papel resultantes. El interés del trabajo es generalizado, ya que estudia la producción



de papel a través de una materia prima no maderera y alternativa a las materias primas convencionales utilizadas en la fabricación de pastas de papel, contribuyendo a suplir la falta de materias primas madereras que en la actualidad se está produciendo. Se trata, por otro lado, de una fuente de eliminación de ingentes cantidades de residuos agrícolas, que aportan costes a las explotaciones agrarias y deterioros en los sistemas ecológicos en forma de incendios o plagas, al tiempo se que evitan deforestaciones.

2. Experimental

2.1 Proceso de pasteado

Se utiliza un reactor de 20L donde se introduce la materia prima molida y tamizada, añadiendo los reactivos de cocción y el agua necesarias para conseguir el hidromódulo o relación líquido/sólido a la temperatura y tiempo fijados. Los materiales cocidos se filtran y lavan para eliminar las lejías y, añadiendo agua, se pasan por el desfibrador húmedo. Posteriormente se separan las fibras e incocidos, lavando nuevamente la pasta en un separador. Para el secado de las pastas se utiliza un filtro de 0,16 mm de luz de malla, se someten a un escurrido en una centrifuga y se secan a temperatura ambiente hasta una humedad aproximada del 10%. Se realiza un proceso de pasteado organosolv con etanolamina siguiendo un diseño de experimentos según los siguientes máximos y mínimos (-1,0,1).

Temperatura (°C)	=	160	170	180
Tiempo (min)	=	30	60	90
% Dietanolamina	=	60	70	80

Las variables independientes se normalizan de -1 a +1, con el fin de facilitar la comparación y comprender mejor los efectos de las variables independientes individualmente sobre la variable respuesta.

2.2. Formación de hojas

Para la formación de las hojas, las pastas se tratan en el desintegrador durante 30 minutos, añadiéndoles el agua necesaria para alcanzar una consistencia del 1,5%, según la norma UNE 57-026. Posteriormente la pasta desintegrada se lleva al formador de hojas, obteniéndose una hoja circular húmeda, que se despega de la malla del formador mediante papel de filtro. A continuación la hoja se prensa para eliminar humedad. Finalmente se lleva al secador hasta alcanzar la humedad de equilibrio correspondiente a la humedad relativa del ambiente.

2.3. Caracterización morfológica

El sistema MorFi LB01, es un analizador de morfología de fibras, utilizado principalmente en el análisis de fibras celulósicas, que sigue un método de análisis de imagen. El equipo lleva a cabo un reconocimiento morfológico de las fibras. Este proceso es llevado a cabo mediante una división de las imágenes en píxeles (10 píxeles) y su posterior análisis del



porcentaje de color en escala de grises. La principal diferencia del equipo con respecto a otros que también usan el análisis de imagen, es que en este caso el haz de luz es no polarizada, por lo que permite medir con bastante exactitud y precisión las características morfológicas de fibras, finos y vasos, distinguiendo estos tres elementos en función de su tamaño. Para la caracterización morfológica de las fibras de celulosa se pesan 0,4 gramos de papel seco y se disgrega el papel a 1500 rpm. En las medidas se utiliza el MorFi LB01. Se buscan correlaciones entre los datos obtenidos por el Morfi y las medidas de la caracterización de las pastas así como de las propiedades físicas de las hojas (22,24).

2.4. Caracterización de las pastas

Rendimiento: representa el porcentaje de materia prima que se transforma en pasta. Se determina pesando la materia prima y la pasta obtenida una vez seca, y dividiendo éste último peso por el de materia prima libre de humedad, multiplicando el cociente por cien.

Índice Kappa: se define como el número de ml de disolución de permanganato potásico 0,1N consumidos por gramo de pasta seca, bajo las condiciones especificadas en la norma UNE 57-034. Este índice Kappa indica la aptitud al blanqueo o grado de deslignificación de las pastas.

Viscosidad: la viscosidad intrínseca de las pastas se determina en una disolución de cuprietilendiamina, siguiendo la norma UNE 57-039, con un viscosímetro de Oswald.

2.5. Caracterización de las hojas

Carga de Rotura: cuando una tira de papel, fijada por un extremo, se somete a un esfuerzo de tracción por el otro, se rompe; la fuerza necesaria para ello se denomina carga de rotura y se calcula siguiendo las normas UNE 57-054 y UNE 57-028.

Alargamiento: durante el ensayo de la carga de rotura, el papel va sufriendo un alargamiento progresivo, que es máximo en el momento de la rotura, denominándose entonces alargamiento a la tracción. Este ensayo se hace según las normas UNE 57-054 y UNE 57-028.

Desgarro: Es la resistencia que ofrece la hoja a la rotura por medio de una fuerza que actúe para rasgarla cuando el corte ya está iniciado. Para llevar a cabo este ensayo se sigue la norma UNE 57-033, que consiste en realizar un corte inicial en la probeta de papel y desgarrarla a lo largo de una distancia fija, utilizando un aparato previsto de un péndulo para aplicar la fuerza de desgarro.

Blancura: depende de las fibras utilizadas y de la concentración de cargas y pigmentos. El grado de blancura requerido dependerá del uso final que se le vaya a dar a ese papel.



Grado de desgote o grado de refinado: para calcular este valor se utiliza el método del desgote, que consiste en hacer desgotar una suspensión fibrosa a través de una torta que se va formando sobre una malla metálica y medir el volumen que rebosa de un cono provisto de un agujero calibrado, que actúa a modo de viscosímetro empírico. El grado de desgote se mide en °SR y para su cálculo se sigue la norma UNE 57-025.

Índice de estallido: cuando un papel se somete a una presión uniforme repartida sobre una parte circular de su superficie, de un diámetro determinado, llega un momento en que por efecto de la presión el papel estalla. La presión a que se produce este hecho es el valor del estallido del papel.

3. Resultados y discusión

De las figuras 1 y 2 cabe destacar que las condiciones severas provocan una mayor degradación de las fibras y por tanto una mayor presencia de finos. Además en la figura 1 se muestran ejemplos de fibras, finos, vasos e incocidos. En la tabla 1 se muestra la relación entre las características morfológicas y las propiedades de la pasta y el papel. La propiedad morfológica que más correlaciones proporciona es la longitud media de fibras; esto es debido a que es uno de los parámetros que más influencia tiene sobre las propiedades y la calidad finales del papel.



Tabla 2. Correlaciones obtenidas al representar las propiedades morfológicas obtenidas con el morfi, frente a las propiedades del papel

ORGANOSOLV	FIBRAS	VASOS	FINOS
Rendimiento	$y = 0,2567x - 81,23$ $R^2 = 0,7498$	Sin correlación	Sin correlación
Índice Kappa	$y = 0,1618x - 33,185$ $R^2 = 0,8015$	Sin correlación	Sin correlación
Viscosidad	$y = 1,3916x - 55,587$ $R^2 = 0,8057$	Sin correlación	Sin correlación
Grado de desgote	Sin correlación	$y = -0,0002x^2 + 0,0654x + 13,598$ $R^2 = 0,769$	Sin correlación
Longitud de ruptura	$y = 0,1484x^2 - 155,99x + 42074$ $R^2 = 0,8623$	$y = 0,3121x^2 - 122,26x + 13021$ $R^2 = 0,9287$	$y = 2E-05x^2 - 1,5966x + 28973$ $R^2 = 0,9815$
Alargamiento	$y = 9E-05x^2 - 0,0923x + 25,062$ $R^2 = 0,8432$	$y = 0,0005x^2 - 0,1941x + 22,72$ $R^2 = 0,8423$	$y = 2E-08x^2 - 0,0011x + 21,229$ $R^2 = 0,9767$
Índice de estallido	$y = 0,0098x - 4,9891$ $R^2 = 0,8816$	Sin correlación	$y = 1E-08x^2 - 0,0008x + 15,237$ $R^2 = 0,9728$
Índice de desgarro	$y = 1E-06x^2 - 0,0009x + 0,5359$ $R^2 = 0,8347$	$y = 2E-06x^2 - 0,0014x + 0,591$ $R^2 = 0,9251$	Sin correlación
Blancura	$y = -0,0005x^2 + 0,5413x - 104,9$ $R^2 = 0,7129$	Sin correlación	Sin correlación

4. Conclusiones

En cuanto a la serie de 15 muestras de pasta obtenida mediante el proceso organosolv con etanolamina, se ha visto que la propiedad con la que se han podido obtener más correlaciones ha sido la longitud de las fibras. Esto es debido a que éste es uno de los parámetros que más influyen en las propiedades del papel, ya que un mayor número de



fibras y una mayor longitud de las mismas implican mejores propiedades mecánicas del papel. Por el contrario cuanto mayor es el número de finos y vasos, peores son las propiedades mecánicas del papel, ya que éste se vuelve mucho más frágil al haber un menor entrecruzamiento

Bibliografía

- (1) Pérez, A. (2006). Obtención de pastas celulósicas a partir de materias primas no madereras. Tesis Doctoral. Universidad de Córdoba.
- (2) Jiménez, L. (2007). Aprovechamiento de residuos agrícolas. Conferencia en el INIA. Madrid.
- (3) Casey, J.P. (1990). Pulpa y Papel. ED Noriega-Limusa. México.
- (4) Jimenez, L. (2005). Pastas celulósicas de materias primas alternativas a las convencionales. Editorial Gráficas Sol. Sevilla.
- (5) Navaee-Ardeh, S., Mohammadi-Rovshandeh, J. y Pourjoozi, M. (2004). Influence of rice straw cooking conditions in the soda-ethanol-water pulping on the mechanical properties of produced paper sheets. *Bioresource Technology* 92. 65-69.
- (6) Roliadi, H., Siagian, R.M., Mas'Ud, A. y Gintings, A. (2003). The possible utilization of old newsprint, sludge waste, and abaca fibers as raw material for pulp/paper manufacture with satisfactory qualities / results : an attempt to reduce heavy dependency on the conventional wood. *Appita Annual Conference and Exhibition*. 57th 75-81.
- (7) Peralta, A. (1996) Pulp produced from decorticated abaca fiber. *TAPPI Journal*. 79(3) 236-6.
- (8) López, F., Alfaro, A., García, M.M., Díaz, M.J., Calero, A. y Ariza, J. (2004). Pulp and paper from tagasaste (*Chamaecytisus proliferus* L.F. ssp. *Palmensis*). *Chemical Engineering Research and Design*. 82(A8) 1029-1036.
- (9) Jiménez, L., Rodríguez, A., Eugenio, M.E., Alfaro, A. y González-Duque, J.A. (2002). Plant fibers as alternatives for papermaking: characterization of tagasaste. *Ingeniería Química*. 34(389) 107-114.
- (10) Jiménez, L., Rodríguez, A., Ferrer, J.L., Pérez, A. y Angulo, V. (2005). La Paulownia: una planta de rápido crecimiento como materia prima para la fabricación de papel. *Afinidad* 62 (516) 100-105.



- (11) Pereira, H., Oliveira, M.F y Miranda, I. (1986) Kinetics of ethanol-water pulping and pulp properties of *Eucalyptus globulus*. *Appita Journal* 39,6 455-458.
- (12) Jiménez, L., García, J.C. y Pérez, I. (2003). Influence of cooking variables in the organosolv pulping of wheat straw using mixtures of ethanol-acetone and water. *TAPPI Journal*, 2,1 27-31.
- (13) López, F., Alfaro, A. y Jiménez, L. (2005). Pasteado con disolventes orgánicos. Alcoholes. En: *Pastas celulósicas de materias primas alternativas a las convencionales*. Jiménez y col. Ed. Gráficas-Sol. España.
- (14) López, F., Alfaro, A., Jiménez, L. y Rodríguez, A. (2006) Los alcoholes como disolventes orgánicos para la obtención de pastas celulósicas. *Afinidad*.63(523), 174-182.
- (15) Paszner, L. y Cho, H.J. (1989) Organosolv pulping: acid catalysis options and their effect on fiber quality and delignification. *TAPPI Journal* 72,2 135-142.
- (16) Jiménez, L., de la Torre, M.J., Bonilla, J.L. y Ferrer, J.L. (1998) Organosolv pulping of wheat straw by use of acetone-water mixtures. *Process Biochemistry* 33, 4, 401-408.
- (17) Jiménez, L., de la Torre, M.J., Maestre, F., Ferrer, J.L. y Pérez, I. (1987). Organosolv pulping of wheat Straw by use of phenol. *Bioresource Technology*, 60, 199-205.
- (18) Jiménez, L., de la Torre, M.J., López, F. y Ariza, J. (2000). Use of formaldehyde for Making Wheat Straw Cellulose Pulp. *Bioresource Biotechnology Organosolv pulping of wheat Straw by use of phenol*. *Bioresource Technology*, 72, 283-288.
- (19) Jiménez, L., Rodríguez, A., Calero, A.M. y Eugenio, M.E. (2004). Use of ethanolamine-soda-water mixtures for pulping olive wood trimmings. *Chemical Engineering Research and Design* 82(A8) 1037-1042.
- (20) Jiménez, L., Rodríguez, A., Ferrer, J.L., Jiménez, R.M. y Calero, A. (2003). Use of mixtures of ethylene glycol, sodium hydroxide and water to obtain cellulose paste form olive tree prunings. *Afinidad* 60(506). 387-395.
- (21) Ana Moral Rama. *Biorrefinería de la paja de arroz. Obtención de pasta celulósica y otros productos de fraccionamiento*. Departamento de Ingeniería Química y Química Inorgánica. Facultad de Ciencias. Universidad de Córdoba. Diciembre 2007.



-
- (22) Marta Serrano Ruiz. Caracterización morfológica de fibras, finos y vasos en suspensions de pastas papeleras. Departamento de Ingeniería Química. Facultad de Ciencias Químicas. Universidad Complutense de Madrid. Septiembre 2007.
 - (23) Morfi Labo (LM 01). User's Manual.
 - (24) Morfi Labo (LM 01). Use of the software.