

USO DE REGRESIONES MÚLTIPLES PARA LA PREDICCIÓN DE LAS PROPIEDADES DE LAS PULPAS CMP DE SALICÁCEAS

Monteoliva S.E.

Doctora, Docente-Investigador, Jefe de Trabajos Prácticos Cátedra de Xilotecnología, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, UNLP. CC 31 (1900) La Plata, Argentina. e-mail:

dendrologia@agro.unlp.edu.ar

RESUMEN

El objetivo del trabajo fue el desarrollo de modelos de regresión para la predicción de las propiedades de las pulpas CMP de sauces y álamos, en base a las características anatómicas y químicas de la madera. Se trabajó sobre 6 clones de sauces (*Salix babylonica*, *S babylonica* x *Salix alba* 'A-131-25', 'A 131-27' y 'A 250-33', *Salix matsudana* x *Salix alba* 26992' y 'A 13-44') y 8 de álamos (*Populus x canadensis* 'Triplo', 'Conti 12', '568-1' y '2000 Verde'; *Populus deltoides* '610-11', '610-31', '562-47' y 'Delta Gold') de plantaciones experimentales de 13 y 10 años de edad. Los sauces provienen de dos sitios de implantación uno en el Delta Medio (Establecimiento Las Animas, Papel Prensa SA.) y otro en un sitio Continental en Los Hornos, Provincia de Buenos Aires (Estación Experimental de la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, UNLP). Los álamos provienen de un solo sitio en Bragado, Provincia de Buenos Aires (Establecimiento María Dolores, Papel Prensa SA.). Se midieron las siguientes propiedades: densidad básica, morfología de fibras (longitud, ancho, lumen y espesor de pared) y composición química (celulosa, lignina, extractivos en alcohol-benceno, extractivos en agua caliente, solubles en hidróxido de sodio). Se prepararon 20 pulpas quimimecánicas en escala Planta Piloto (12 de sauces y 8 de álamos) y se determinaron sobre hojas de ensayo las siguientes propiedades: tracción, rasgado, blancura y coeficiente de dispersión. Se probaron modelos de regresión múltiple lineales y no lineales, tomando las propiedades de la madera como variables independientes. Se encontraron ecuaciones significativas y de alto R^2 para la mayoría de las propiedades, tanto en sauces como en álamos. Las propiedades mecánicas de resistencia están ligadas a propiedades como contenido de celulosa, longitud de fibras y contenido de solubles en hidróxido de sodio. Las ecuaciones de mejor R^2 para los sauces son las cuadráticas, mientras que en los álamos las ecuaciones lineales explican la mayoría de las propiedades con buenos coeficientes. Las propiedades ópticas se hallan asociadas en la mayoría de los casos a los niveles de lignina insoluble y no a los extractivos. Para el coeficiente de dispersión no fue posible hallar ecuaciones significativas en ningún caso. Los diferentes clones de sauces y álamos presentan propiedades de la madera diferentes que se traducen en la calidad de la pulpa obtenida. Es posible entonces, predecir las propiedades de las pulpas quimimecánicas de Salicáceas, a partir de las propiedades medidas en la madera.

Palabras clave: ecuaciones, relaciones madera-pulpa, propiedades madera

INTRODUCCION

Las Salicáceas (sauces y álamos) por su baja densidad de madera y su blancura son aptas para la elaboración de pulpas de alto rendimiento. En Argentina la madera de sauce es utilizada como pulpa quimimecánica por Papel Prensa SA como parte de sus empastes en la producción de papel de diario y de revistas o impresión en general.

El comportamiento de una especie frente a un determinado pulpado depende de las características intrínsecas físicas y químicas de la materia prima (Deka et al 1992; Pipan 1989). La relación que existe entre las características de la madera y las propiedades de la pulpa puede cuantificarse mediante la aplicación de modelos de regresión múltiple. La validación de estos modelos permite la predicción del comportamiento que tendrá un determinado material

fibroso a partir de sus características físicas y químicas. La ventaja de la utilización de estas variables predictivas radica en que son propiedades de la madera que pueden determinarse sin realizar experiencias de pulpado.

Varios autores han intentado relacionar las propiedades de la madera con la calidad de la pulpa (en iguales condiciones operativas de procesamiento), con resultados dispares. En general podría asegurarse que ninguna de las variables de la madera por sí misma provee los mejores ajustes con todas las propiedades (Area y Gavazo 1990; Monteoliva et al 2004b). Estas relaciones han sido mucho más estudiadas en pulpados químicos (Wangaard 1962; Ona et al 2001), y en pulpas mecánicas puras de coníferas (Forgacs 1963). Sin embargo, los antecedentes que existen para establecer esta relación con pulpas quimimecánicas en especies de latifoliadas (Ruzinsky, 1996;) son escasos. En particular para el género *Salix*, Monteoliva (2005) ha desarrollado algunas relaciones a través de modelos de regresión y de análisis multivariados. Algunos de estos resultados pueden encontrarse en Monteoliva et al (2004b) y Monteoliva y Area (2006).

La respuesta de las pulpas de carácter mecánico frente a los esfuerzos de tracción y rasgado, o a las propiedades ópticas y de impresión, se pueden explicar a través del delicado equilibrio de las 3 fracciones que componen estas pulpas (fibras, finos y haces fibrosos) y su función en la formación de la trama de papel. Las resistencias están ligadas a la proporción de fibras enteras y a la fibrilación de sus paredes. La presencia de finos fibrilares aumenta la habilidad de desarrollar uniones interfibras (*bonding*) (Lindholm 1980 a y b). Las propiedades ópticas y de impresión que caracterizan a estas pulpas se asocian fuertemente a la presencia de finos y a la trama particular de la hoja, que facilita una mayor dispersión de la luz (Mohlin 1989; Olander et al 1991; Reme & Helle 1998).

El objetivo del trabajo fue el desarrollo de modelos de regresión para la predicción de las propiedades de las pulpas CMP de sauces y álamos, en base a las características anatómicas y químicas de la madera.

MATERIALES Y METODOS

Se trabajó, en parte, con los resultados obtenidos en un trabajo anterior, en el que se determinaron las propiedades anatómicas, físicas y químicas de la madera y se obtuvieron pulpas quimimecánicas, de 6 clones de sauces (*Salix sp*) provenientes de 2 sitios diferentes de implantación (Delta Medio: DM y Continental: C). Las metodologías utilizadas para la caracterización de los mismos se describen extensamente en Monteoliva et al (2004a).

Se sumaron además, los datos de las propiedades de la madera y de las pulpas de 8 clones de álamos de 10 años de edad, provenientes de un ensayo comparativo de clones iniciado por el CIEF en el Establecimiento María Dolores de Papel Prensa SA., Bragado, Provincia de Buenos Aires.

Los álamos muestreados fueron: *Populus deltoides* 'A 562-47', *P. deltoides* 'A 610-11', *P. deltoides* 'A 610-31', *P. deltoides* 'Delta Gold' ("Stoneville 66"), *Populus x canadensis* 'A 568-1', *Populus x canadensis* 'I Triplo', *Populus x canadensis* 'I 2000 Verde', *Populus x canadensis* 'I Conti12'.

Los sauces involucrados en el estudio fueron: *Salix babylonica* x *Salix alba* 'A 250-33', *S. babylonica* x *S. alba* 'A 131-27', *S. babylonica* x *S. alba* 'A 131-25', *S. matsudana* x *S. alba* 'A 13-44', *S. matsudana* x *S. alba* 'NZ 26992' y *S. babylonica* var. *sacramenta* "sauce americano".

Se aplicaron análisis de regresión múltiple, lineal y no lineal, para evaluar la capacidad de predicción de las variables consideradas independientes, tomando como variables dependientes las propiedades mecánicas y ópticas de las pulpas.

Se probaron modelos lineales y no lineales, del tipo:

$$Y = b_1X_1 + b_2X_2 + \dots$$

$$Y = b_{11}X_1 + b_{12}X_1^2 + b_{21}X_2 + b_{22}X_2^2 + \dots$$

Las variables se estandarizaron restando a cada valor la media aritmética y dividiendo el resultado por el desvío estándar de la muestra. Este método se utiliza para unificar el peso relativo de variables medidas con diferentes escalas. Al trabajar con variables estandarizadas, se elimina el término independiente (ya que la media de los valores es cero), y el valor absoluto del coeficiente de la variable indica su peso relativo en la ecuación. Los valores X en la ecuación representan valores positivos o negativos alrededor de la media.

Las regresiones se obtuvieron colocando a todas las variables independientes consideradas en la ecuación, y eliminando de a una las no significativas (*backward*). Se eliminaron de las ecuaciones las variables independientes correlacionadas (hasta valores inferiores a 0,5). Se evaluó la significación de las ecuaciones comparando los valores de R^2 ajustado por grados de libertad. Se consideraron significativas a las ecuaciones con $R^2 > 0,60$. Los modelos de regresión se confeccionaron y evaluaron con un software específico.

Variables medidas sobre madera, tomadas como variables independientes: Densidad básica (TAPPI T 258-om-94), Longitud de fibras (microscopio óptico con analizador de imágenes), Ancho de fibras, Ancho de lumen, Espesor de pared, Extractivos en agua caliente (TAPPI T 207 cm-99), Extractivos en alcohol benceno (TAPPI T 204 cm-97), Solubles en hidróxido de sodio 1% (TAPPI T 212 om-98), Lignina insoluble (TAPPI T 222 cm-98).

Variables medidas sobre pulpa, y evaluadas como dependientes: Índice de rasgado, Índice de tracción, Blancura, Coeficiente de dispersión de la luz.

RESULTADOS

Se presenta el resumen de los promedios de las variables analizadas en la madera (tabla 1) tanto para álamos como para sauces.

Se puede apreciar que la madera de álamos presenta menor densidad básica que los sauces y fibras de mayor tamaño (mayor longitud, ancho y espesor de pared). En cuanto a la composición química de la madera los álamos presentan menor contenido de solubles en hidróxido de sodio, mientras que los niveles de lignina, extractivos en alcohol-benceno y extractivos en agua caliente son ligeramente menores en promedio para los sauces y con una gran variabilidad entre clones para ambos géneros (álamos y sauces) (tabla 1).

Tabla 1. Variables medidas en la madera

	Densidad (g/cm ³)	Longitud (µm)	Ancho (µm)	Lumen (µm)	Espesor (µm)	Extractivos a-tolueno %	Extractivos a-caliente %	Solubles %	Lignina insoluble %	
Alamos										
<i>Populus deltoides</i>	‘A 562-47’	0,325	1041	20,8	14,8	3,0	3,63	3,65	19,62	22,62
	‘A 610-11’	0,328	1013	20,3	13,4	3,5	2,10	2,17	17,74	23,98
	‘A 610-31’	0,344	964	20,3	14,1	3,1	3,09	1,47	17,21	22,75
	“Stv 66”	0,341	926	21,1	13,5	3,8	4,57	4,02	17,61	25,36
<i>Populus x canadensis</i>	‘A 568-1’	0,336	1015	20,4	14,0	3,2	2,56	3,25	16,42	22,65
	‘I Triplo’	0,313	1029	20,8	13,6	3,6	1,74	3,70	17,30	27,53
	‘I 2000V’	0,326	1055	21,0	14,	3,5	2,34	2,68	17,56	23,61
	‘I Conti12’	0,322	949	21,9	14,5	3,7	2,35	3,59	17,53	23,90
Promedio general álamos	0,329	999	20,8	13,9	3,4	2,98	3,1	17,63	24,10	

Sauces*										
	`A 250-33' C	0,398	946	14,8	9,2	3,1	3,1	4,2	24,4	20,5
	`A 250-33' DM	0,387	968	15,5	9,9	2,5	2,4	2,2	20,5	21,3
<i>S.babylonica</i> x <i>S. alba</i>	`A 131-27' C	0,386	838	14,5	10,1	2,9	2,8	3,5	23,3	20,1
	`A 131-27' DM	0,385	899	15,9	10,4	2,1	2,5	2,7	20,4	21,0
	`A 131-25' C	0,383	941	15,8	11,8	2,3	2,9	3,6	23,3	21,5
	`A 131-25' DM	0,366	885	16,4	10,7	2,5	2,8	2,3	22,3	22,2
<i>S.matsudana</i> x <i>S. alba</i>	`A 13-44' C	0,444	864	14,3	8,0	2,8	3,0	3,3	24,2	20,4
	`A 13-44' DM	0,438	847	13,5	9,0	2,7	2,4	2,1	24,7	20,7
	`NZ 26992' C	0,372	841	15,8	9,2	2,7	2,9	3,1	22,5	19,0
	`NZ 26992' DM	0,369	812	14,6	11,2	2,3	3,1	2,3	22,5	20,5
<i>S.babylonica</i> var. <i>sacramenta</i>	Americano C	0,427	1069	15,7	9,2	3,3	2,3	2,2	20,5	19,5
	Americano DM	0,435	1167	16,1	9,1	3,3	1,9	1,9	19,0	21,1
Promedio general sauces		0,399	923	15,2	9,8	2,7	2,7	2,8	22,3	20,7

*Sitios: C: Continental; DM: Delta Medio

En la tabla 2 se presentan los valores promedio obtenidos en las propiedades de las pulpas quimimecánicas realizadas en Planta Piloto.

Se aprecian diferencias en las propiedades para ambos géneros. Los álamos, en promedio, presentan una mayor resistencia a la tracción y menor al rasgado, que los sauces. En cuanto a las propiedades ópticas, la blancura obtenida en las pulpas de álamos es notablemente superior que aquellas realizadas con sauces, mientras que el coeficiente de dispersión es similar.

Tabla 2. Variables medidas en la pulpa

		Rasgado (Nm ² /kg)	Tracción (Nm/g)	Blancura (%)	s (%)
Alamos					
<i>Populus</i> <i>deltoides</i>	`A 562-47'	3,6	28,5	58,1	43,6
	`A 610-11'	3,2	26,5	64,7	45,4
	`A 610-31'	2,9	22,0	62,3	44,2
	"Stv 66"	2,9	22,0	59,3	39,6
<i>Populus x</i> <i>canadensis</i>	`A 568-1'	3,1	25,8	62,2	45,5
	`I Triplo'	3,4	26,3	60,5	42,9
	`I 2000V'	3,3	27,5	60,7	42,4
	`I Conti12'	2,8	23,5	55,7	43,0
Promedio general álamos		3,2	25,3	60,4	43,3
Sauces*					
<i>S.babylonica</i> x <i>S. alba</i>	`A 250-33' C	3,7	19,1	44,2	42,3
	`A 250-33' DM	4,0	26,8	42,3	46,1
	`A 131-27' C	3,4	20,8	48,6	44,3
	`A 131-27' DM	3,4	21,0	45,4	45,5
	`A 131-25' C	3,2	18,1	38,9	39,8
	`A 131-25' DM	2,9	15,1	40,4	43,3
<i>S.matsudana</i> x <i>S. alba</i>	`A 13-44' C	2,9	16,9	49,4	44,6
	`A 13-44' DM	3,7	15,7	48,1	42,0
	`NZ 26992' C	3,8	18,1	46,8	39,9
	`NZ 26992' DM	3,5	27,6	40,0	43,4
<i>S.babylonica</i> var. <i>sacramenta</i>	Americano C	3,8	23,3	50,4	43,1
	Americano DM	3,2	28,2	41,2	44,1
Promedio general sauces		3,5	21	44,7	43,2

*Sitios: C: Continental; DM: Delta Medio

Regresiones múltiples

Los modelos de regresión se desarrollaron por separado para cada género, dadas las diferencias halladas en las propiedades de la madera y de las pulpas.

1- Álamos

Tabla 3. Ecuaciones de regresión lineales entre variables de la madera (independientes) y variables de la pulpa (dependientes) para los álamos

Propiedad	Ecuación	R ²
I. de Rasgado	0,90 longitud + 0,35 solubles	0,84
I. de Tracción	0,93 longitud	0,90
Blancura	- 0,88 ancho fibras	0,75
Coefficiente dispersión	- 0,62 solubles – 0,42 lignina	0,93

La tabla 3 muestra las ecuaciones halladas para las 4 variables dependientes. La longitud de fibras se presenta en las ecuaciones de resistencia y aparece como una importante propiedad de la madera que afecta la calidad de la pulpa. Con respecto a las propiedades ópticas, el coeficiente de dispersión está relacionado negativamente con la lignina insoluble y los solubles en OHNa, en cambio el blanco presenta una ecuación significativa (aunque de bajo R²) con el ancho de las fibras.

2- Sauces

Tabla 4. Ecuaciones de regresión lineales entre variables de la madera (independientes) y variables de la pulpa (dependientes) para los sauces

Propiedad	Ecuación	R ²
I. de Rasgado	--	Ns
I. de Tracción	- 0,47 Lignina - 0,62 Solubles	85
Blancura	- 0,49 lumen - 0,47 Lignina	65
Coefficiente dispersión	--	Ns

No se encontraron ecuaciones significativas para todas las propiedades de las pulpas. Para el Índice de Rasgado y el coeficiente de dispersión no se obtuvieron ajustes significativos.

La lignina insoluble apareció en todas las ecuaciones. Para las propiedades de resistencia, como tracción, su incidencia fue negativa, ya que dificulta la fibrilación de las fibras, disminuyendo su capacidad de *bonding*. En la blancura influyó en forma negativa debido a que es una de las fuentes principales de grupos cromóforos de la madera.

Los R² hallados para sauces son menores que los obtenidos para las ecuaciones de álamos (tabla 3).

Los ajustes no mejoraron con la inclusión de las variables en forma cuadrática, tanto para álamos como para sauces.

CONCLUSIONES

Ninguna característica de la madera explica por sí sola el comportamiento de las pulpas quimimecánicas de salicáceas

Todas las ecuaciones presentaron términos que involucran a la composición química de la madera, demostrando la importancia de estas variables en la construcción de modelos de predicción para el pulpado CMP de latifoliadas.

La longitud de fibras, el lumen, la lignina insoluble y el contenido de solubles en hidróxido de sodio son las cualidades de la madera que mejor predicen la calidad de las pulpas quimimécnicas de salicáceas. A diferencia de las pulpas mecánicas puras, la utilización de estas características físicas, químicas y anatómicas de la madera como variables independientes permite predecir en forma razonable muchas de las propiedades de las pulpas quimimécnicas, por lo cual pueden utilizarse como un primer criterio de selección para obtener materias primas con mejores propiedades mecánicas y ópticas.

BIBLIOGRAFIA

- 1- Area M.C., Gavazo G.B. 1990. Caracterización y propiedades de pulpas de alto rendimiento. 26° Congreso Técnico sobre Celulosa y Papel, ATIPCA, trabajos técnicos, Buenos Aires. 469-483.
- 2- Deka, G.C.; Wong, B.M.; Roy, D.N. 1992. Suitability of hybrid willow as a source of pulp. *Journal of Wood Chemistry and Technology* 12: 197-211.
- 3- Forgacs O.L. 1963. The characterization of mechanical pulps. *Pulp and Paper Magazine of Canada*, Conv. Issue: T89-T118.
- 4- Lindholm, C.A. 1980a. Comparison of some papermaking properties of groundwood, pressure groundwood and thermomechanical pulp by means of artificial blends of pulps fractions. Part. 1. Primary results. *Paperi ja Puu*, 10: 593-606.
- 5- Lindholm, C.A. 1980b. Comparison of some papermaking properties of groundwood, pressure groundwood and thermomechanical pulp by means of artificial blends of pulps fractions. Part. 2. The fines fractions. *Paperi ja Puu* 12: 803-806.
- 6- Mohlin U B. 1989. Fibre bonding ability – a key pulp quality parameter for mechanical pulps to be used in printing papers. *International Mechanical Pulping Conference, Helsinki*. Preprints vol. 1: 49-57.
- 7- Monteoliva S. 2005. Propiedades intrínsecas de la madera de seis clones de sauces y su relación con el pulpado quimimécánico. Tesis Doctoral (inédito). Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, UNLP.
- 8- Monteoliva S., Area M.C., Felissia F. 2004a. Pulpados CMP de sauces. Parte 1: Evaluación de las pulpas para su uso en papel periódico. Presentado en CIADICYP 2004.
- 9- Monteoliva, S; Area MC; Felissia F. 2004b. Pulpas CMP de sauces para papel periódico. Parte 2. relaciones madera - pulpas.
- 10- Olander K; Gren U.; Htun M. 1991. Specific surface area – An important property of mechanical pulps. *International Mechanical Pulping Conference, USA. TAPPI Proceedings*: 81-86.
- 11- Ona T.; Sonoda T.; Ito K.; Shibata M.; Tamai Y.; Kojima Y.; Ohshima J.; Yokota S.; Yoshizawa N. 2001. Investigation of relationship between cell and pulp properties in *Eucalyptus* by examination of within-tree property variation. *Wood Science and Tech*, 35: 229-243.

- 12- Pipan C. 1989. El rol de las fibras en el papel. Congreso ATIPCA, Buenos Aires. Trabajos Técnicos, 55-92.
- 13- Reme P.A; Helle T. 1998. Fibre characteristics of some mechanical pulp grades. Nordic Pulp and Paper Research Journal 13 (4): 263-268.
- 14- Ruzinsky F, Tomasec M., Kokta B.; Garceau J.J. 1996. Relationship between ultra-high yield aspen pulp properties and fiber characteristics by multiple lineal regressions. Cellulose Chem. Technol. 30: 267-279.
- 15- Wangaard F.F. 1962. Contribution of hardwood fibres to the properties of kraft pulps. TAPPI 45 (7): 548-556.