

VARIABILIDAD DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS, MORFOLOGICAS Y TERMICAS DE LA FIBRA DE CORTEZA DE *Eucalyptus nitens*

VARIABILITY OF PHYSICAL, MORPHOLOGICAL AND THERMAL PROPERTIES OF *Eucalyptus nitens* BARK FIBER

Freddy Muñoz^{1,2,*}, Aldo Ballerini³, William Gacitúa³

RESUMEN

Se estudió la variabilidad en las propiedades morfológicas, físicas y térmicas de la fibra de corteza de *Eucalyptus nitens* (Deane & Maiden) en veinticuatro árboles procedentes de dos sitios y seis familias; mediante técnicas de microscopía óptica convencional, microscopía electrónica (SEM) y análisis termogravimétrico (TGA). Dichas propiedades son determinantes para que una fibra lignocelulósica alcance una posible aplicación industrial como material de refuerzo en una matriz termoplástica. Se detectaron diferencias estadísticas significativas en las propiedades de la fibra al analizar el sitio de procedencia de las muestras, la familia y la altura de fuste. Destacan en los resultados de propiedades físicas el espesor promedio de la capa de corteza (4.4 mm), su peso específico (0.757), sus propiedades morfológicas tales como razón longitud/diámetro de fibra ($l_f/d_f = 69.14$) y presencia de fibra (45%) en este material. La estabilidad térmica de esta fibra natural hasta los 200°C y la baja temperatura de fusión de termoplásticos como el polietileno de alta densidad (HDPE); indican que las fibras de corteza de esta especie son una buena opción para aplicarla como material de refuerzo en matrices termoplásticas.

Palabras clave: Fibras de corteza, morfología, *Eucalyptus nitens*, SEM, TGA

ABSTRACT

It was studied the variability in morphological, physical and thermal properties of fiber bark of *Eucalyptus nitens* (Deane & Maiden) coming from twenty four trees, two sites and six families; using techniques such as conventional light microscopy, electron microscopy (SEM) and thermo-gravimetric analysis (TGA). Such properties are relevant for a lignocellulosic fiber to have a possible industrial application as reinforcement material in a thermoplastic matrix. Significant statistical differences were detected in the fiber properties by analyzing the site of origin of the samples, family and stem height. Standing out in the results of physical properties, the average thickness of the bark layer (4.4 mm), its Specific Gravity (0.757), its morphological properties such as length/diameter of fiber ($l_f/d_f = 69.14$) and fiber presence (45%) in this material. The thermal stability of this natural fiber to 200°C and low melting temperature of thermoplastics such as High Density Polyethylene (HDPE); indicate that the bark fibers of this species are a good option to apply as a reinforcement material in thermoplastics matrices.

Keywords: Bark fibers, morphology, *Eucalyptus nitens*, SEM, TGA

¹Profesor Adjunto, M.Sc. Escuela de Ingeniería Forestal. Tecnológico de Costa Rica, Cartago-COSTA RICA.

²Ph.D. (c). Programa Ciencias e Industrias de la Madera. Facultad de Ingeniería. Departamento Ingeniería en Maderas

Universidad del Bío-Bío, Concepción-CHILE

³Profesor Asociado, Ph.D. Facultad de Ingeniería. Departamento Ingeniería en Maderas. Universidad del Bío-Bío, Concepción-CHILE.

Autor para correspondencia: *fmunoz@tec.ac.cr

Recibido: 08.02.2012 Aceptado: 30.06.2012

INTRODUCCION

En Chile existen 168 mil hectáreas plantadas con *Eucalyptus nitens* (Deane & Maiden), concentradas entre las regiones del Bío-Bío y Los Lagos. Estadísticas forestales (INFOR 2008), reportan que la región del Bío-Bío consume aproximadamente 3 millones de m³ de madera en trozo/año de *E. nitens*. Por otro lado, Geldres *et al.* (2006), consideran que el volumen promedio de la corteza de un árbol de *E. nitens* con edad entre 4-7 años, representa un 9.3 % del volumen total del árbol, esto significa aproximadamente un volumen de 279 mil m³ de corteza/año potencialmente disponible como materia prima.

Diferentes industrias de la madera como por ejemplo: aserraderos, plantas de tableros, de pulpaje y papel, tratamiento de postes, así como también la exportación de madera; por varias razones requieren el proceso de descortezado (Grobbelaar y Manyuchi 2000). Por la falta o poca información sobre las características y calidad de este subproducto forestal, la corteza muchas veces es solo usada para producir energía o es dejada en el bosque luego del aprovechamiento forestal. En este escenario Velásquez (2006), propuso una valoración global y clasificación del residuo que podría ser utilizado como fuente de energía y una redefinición del residuo que podría ser reutilizable para que otras industrias lo transformen en productos de ingeniería con mayor valor agregado.

Investigaciones actuales en el área de la ingeniería de materiales van orientadas a explorar nuevas fibras naturales como refuerzo de matrices termoplásticas para el desarrollo de nuevos materiales y aplicaciones. Por lo que, los materiales compuestos reforzados con fibra lignocelulósica se han convertido en un área emergente en la ciencia de polímeros (Nabi y Jog 1999). De acuerdo a Taj *et al.* (2007) y Suresh *et al.* (2009), las matrices termoplásticas son las más utilizadas debido a que su temperatura de procesamiento (temperatura a la cual es adicionada la fibra natural de refuerzo a la matriz termoplástica), no excede los 230 °C, temperatura cercana a la fusión de las poliolefinas tales como el polietileno de alta densidad (HDPE) y el polipropileno (PP).

Fibras naturales procedentes de fuentes forestales y renovables como las de la madera y la corteza; usadas como refuerzo de matrices termoplásticas han dado buenos resultados, así lo demuestran los trabajos de Sewda y Maiti (2007), Yemele *et al.* (2010) y Saini *et al.* (2010) con fibra de corteza, y los de Harper y Wolcott (2004), Migneault *et al.* (2008), Sewda y Maiti (2009), Gacitúa y Wolcott (2009) con fibras de madera. Sin embargo, Nabi y Jog (1999), Saini *et al.* (2010) y Yemele *et al.* (2010) indican que el uso de fibra de corteza como refuerzo en polímeros termoplásticos ha sido poco estudiado, contrario a lo que ha sucedido con otras fibras lignocelulósicas. A pesar de ello Bouafif *et al.* (2009) y Yemele *et al.* (2010), usando fibras de corteza de *Pinus banksiana* (Jack Pine), *Picea mariana* (Black Spruce) y *Populus banksiana* (Aspen), como refuerzo en una matriz de HDPE, lograron obtener resultados positivos y significativos en las propiedades mecánicas del material compuesto respecto del material compuesto sin fibra de corteza como refuerzo.

Considerando que el *E. nitens* es la tercera especie de importancia en Chile (López 2006) y que Grobbelaar y Manyuchi (2000) destacan el potencial de la fibra de corteza como materia prima, se plantea como objetivo de esta investigación estudiar la variabilidad en las propiedades morfológicas, físicas y térmicas de la fibra de corteza de *E. nitens* y evaluar su potencial como fibra de refuerzo en materiales compuestos.

MATERIALES Y METODOS

Sitios de muestreo

La corteza de *Eucalyptus nitens* fue obtenida de un total de 24 árboles, distribuidos en 6 familias, 2 árboles por familia y 2 sitios. Los fundos Coihue Sur (Sitio: Mulchén) y Las Mellizas (Sitio: Yungay) están ubicados en la región del Bío-Bío-Chile y pertenecen a la empresa Forestal Mininco. El origen genético de las 6 familias corresponde a lugares geográficos de Australia: Toorong Plateau (familia 1), Toorong (familia 2), Macalister (familia 3), MT Tangle foot (familia 4), Rubicon Snobs CK Rd (familia 5) y Rubicon (familia 6). Como familia se entiende que cada individuo procede genéticamente de un mismo progenitor. Algunas de las características de las plantaciones muestreadas se indican en la tabla 1. Los ensayos fueron realizados en el Centro de Biomateriales y Nanotecnología de la Universidad del Bío-Bío, Campus Concepción-Chile.

Tabla 1. Características de las plantaciones muestreadas en la Región del Bío-Bío-Chile.

Sitio de muestreo	Coordenadas geográficas	Edad plantación (años)	Número de árboles	Tipo de suelo	Tratamiento silvicultural	Altura comercial del árbol (m)
Mulchén	latitud: 37° 47' S longitud: 72° 13' O	12	12	Arcilloso	Plantación sin raleo	21
Yungay	latitud: 37° 12' S longitud: 71° 54' O	12	12	Trumao	Plantación con raleo	21

Propiedades anatómicas, físicas y morfológicas

De los árboles seleccionados de acuerdo a la tabla 1. Se tomaron 5 trozos pequeños de (10 x 25) mm de corteza al azar a la altura de 1 m y se ablandaron en agua por 8 h, luego se cortaron láminas delgadas sobre la sección transversal en un micrótopo Microm HM 325 y se prepararon las muestras anatómicas agregando safranina (rojo básico 2), para distinguir fibras y azul de Astra para identificar células parénquimáticas. Para la caracterización anatómica de la corteza se utilizó un microscopio Nikon Eclipse E600 y cámara digital Nikon CoolPix 990 para microfotografías de magnificación 200x. Similarmente se usó un estereoscopio Nikon SMZ 1000 y cámara digital Qimaging Micropublisher 3.3 RTV para macrofotografías de magnificación 3x. Para determinar el porcentaje de fibra presente en la corteza, se usaron 5 microfotografías con magnificación 200x y tamaño 2043 x 1533 *píxeles*, imágenes que fueron analizadas con el software Image Pro-Plus®.

La preparación de fibras para el estudio morfológico de la corteza se hizo a partir de 168 discos procedentes de 2 sitios, 6 familias, 12 árboles por sitio, 2 réplicas por familia y 7 alturas de fuste (1, 3, 6, 9, 12, 15 y 18 m). La selección por altura de fuste se basa en el aprovechamiento industrial de la madera de *E. nitens*. De cada disco se prepararon astillas finas de corteza y se colocaron 2-3 astillas por tubo de ensayo y se procedió a macerar el material de acuerdo a técnica de Jeffrey (Jane 1970). Se midió longitud de fibra (l_f) y diámetro de fibra (d_f) a 70 fibras por árbol (10 por cada altura), procedimiento similar al utilizado por Jorge *et al.* (2000) e Igartúa *et al.* (2003). Un total de 1680 fibras fueron analizadas en un microscopio electrónico Zeiss con aumento 2x y 20x para medir l_f y d_f respectivamente. Las imágenes fueron capturadas con cámara digital Polaroid y analizadas con software Wincell® V.5.1A. La morfología y anatomía de la corteza, también se analizó con un microscopio electrónico de barrido (SEM) Jeol JSM-6610LV. Para ello se prepararon dos muestras de corteza en total a la altura de 1 m, una de ellas fue impregnada con resina epóxica para dar soporte mecánico a la pared celular durante el corte en micrótopo usando cuchillo de diamante, y consecuentemente para obtener una buena calidad de superficie para observación a altas magnificaciones.

La preparación de estas muestras involucra el corte de la sección transversal en forma de una pirámide truncada usando primero un cuchillo de acero y luego el corte de una sección transversal de 2 mm² con un cuchillo de diamante usando un micrótopo Leica RM2265. Luego las muestras fueron secadas en

una estufa a 70 °C por 2 horas y recubiertas con oro al vacío en equipo Denton Vacuum Desk V con gas Argón a 50kPa por 3 minutos y 50 mA.

Con un diseño factorial general de 3 factores (sitio, familia y altura de fuste) y con la ayuda del software estadístico Design Expert® V.7.0.2, se analizó el efecto de los factores sobre el promedio de las variables respuesta: espesor de corteza (E_c), volumen de corteza (V_c), densidad anhidra de corteza (D_o), largo de fibra (l_f), diámetro de fibra (d_f) y razón largo fibra/diámetro fibra (l_f/d_f).

Se calcularon los siguientes parámetros respecto a cada altura de fuste: diámetro promedio del disco con corteza y sin corteza (Ec. 1 y 2), espesor promedio de la corteza (Ec. 3), volumen promedio del disco con corteza y sin corteza (Ec. 4 y 5), volumen promedio de la corteza (Ec. 6) y densidad anhidra (Ec. 7).

$$\bar{\varphi}_{cc} = \left(\frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} \right) \quad (1)$$

$$\bar{\varphi}_{sc} = \left(\frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} \right) \quad (2)$$

$$\bar{E}_c = \left(\frac{\bar{\varphi}_{cc} - \bar{\varphi}_{sc}}{2} \right) \quad (3)$$

$$\bar{v}_{cc} = \pi * \bar{r}_{cc}^2 * e \quad (4)$$

$$\bar{v}_{sc} = \pi * \bar{r}_{sc}^2 * e \quad (5)$$

$$\bar{V}_c = (\bar{v}_{cc} - \bar{v}_{sc}) \quad (6)$$

$$\bar{D}_o = \left(\frac{m_o}{v_o} \right) * 1000 \quad (7)$$

Donde:

$\bar{\varphi}_{cc}$: diámetro promedio disco con corteza (mm)

$\bar{\varphi}_{sc}$: diámetro promedio disco sin corteza (mm)

\bar{E}_c : espesor promedio corteza (mm)

\bar{V}_c : volumen promedio corteza (cm³)

\bar{r}_{cc} : radio promedio disco con corteza (mm)

\bar{r}_{sc} : radio promedio disco sin corteza (mm)

\bar{v}_{cc} : volumen promedio disco con corteza (mm³)

\bar{v}_{sc} : volumen promedio disco sin corteza (mm³)

e : espesor del disco ó rodela (mm)

\bar{D}_o : densidad anhidra promedio (kg m⁻³)

m_o : peso anhidro corteza (g), estufa 24 h a 103 °C

v_o : volumen anhidro corteza (cm³) obtenido por desplazamiento de agua a temperatura ambiente

Análisis termo-gravimétrico (TGA)

De una fracción de 500 g compuesta por una mezcla de corteza de ambos sitios, todas las alturas y todas las familias. Se tomaron al azar un total de 9 astillas (2 x 2) mm y el resto fue molida para transformar la corteza en fibras de tamaño 60 y 100 mesh.

Paralelamente y para explorar la compatibilidad térmica entre la fibra y termoplástico, se seleccionó una poliolefina, en este caso, polietileno de alta densidad (HDPE) Hivorex 7000F en forma de pellet, para realizar similar ensayo de termo-gravimetría donde las variables respuesta están asociadas a la degradación térmica que puedan sufrir esta matriz y la fibra de corteza, en un eventual proceso de extrusión y/o inyección. Las muestras fueron previamente acondicionadas en estufa a 70 °C por 72 horas hasta alcanzar una humedad menor a 4% base seca. Para este análisis se usó un analizador termo-gravimétrico TA Instrument-TGA Q50, aplicando un barrido de temperatura desde 25 a 600 °C, a una razón de calentamiento de 10 °C/min, utilizando 3 a 6 mg en cada ensayo, para esta caracterización se utilizó como referencia el trabajo de Yemele *et al.* (2010).

RESULTADOS Y DISCUSION

Anatomía de la corteza y morfología de la fibra

La figura 1, muestra la anatomía y morfología de la corteza de *E. nitens*. En la figura 1A, se aprecian grupos de fibras en color oscuro y en color más claro parénquima y tubos cribosos del floema. En la figura 1B, se observan fibras en color rojo y en color azul parénquima y tubos cribosos del floema. Las figuras 1C y 1D, muestran las variables l_f y d_f respectivamente en los disociados. Las figuras 1E y 1F, muestran imágenes obtenidas mediante microscopía electrónica (SEM) de la corteza, la fibra con lumen estrecho y pared celular gruesa corresponden a fibras tipo esclerénquima. Fibra con lumen más amplio y pared celular delgada corresponden a fibras tipo esclereida.

De acuerdo a Martin y Crist (1970), la corteza puede contener fibras de aproximadamente el mismo largo que las fibras de madera. Para madera de *E. nitens* de 15-16 años, Kibblewhite *et al.* (2000) reportaron valores promedio de $l_f = 860 \mu\text{m}$ y $d_f = 13.2 \mu\text{m}$, mientras que, la fibra de corteza para la misma especie en este estudio presentó valores promedio de $l_f = 1443 \mu\text{m}$ y $d_f = 22.6 \mu\text{m}$, (tabla 3 y figuras 2C y 2D). El análisis de imágenes, reveló que entre ambos tipos de fibras (esclereida y esclerénquima) constituyen alrededor de un 45 % de la estructura anatómica de la corteza.

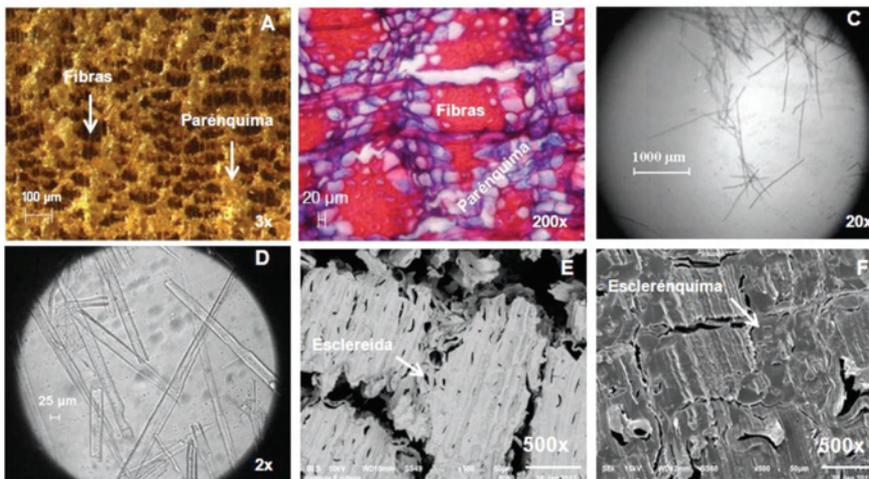


Figura 1. Macro y microfotografías de la estructura anatómica y morfología de la corteza de *Eucalyptus nitens*: **A y B.** Plano transversal. **C.** Largo fibra. **D.** Diámetro fibra. **E.** Microscopía electrónica (SEM) sin resina epóxica. **F.** Microscopía electrónica (SEM) con resina epóxica, llenando los espacios vacíos de la estructura celular de la corteza.

Análisis de Varianza (ANOVA) y parámetros estadísticos

La tabla 2, resume el ANOVA e indica que factores e interacciones son significativos para el modelo usado. Para todas las variables respuesta el modelo es significativo y los efectos principales de los factores contribuyen de la siguiente forma: el factor sitio es significativo para todas las variables, excepto para la razón l_f/d_f . El factor familia es altamente significativo para todas las variables. El factor altura de fuste es altamente significativa solo para E_c , V_c y d_f . Mientras que, las interacciones de segundo orden afectan de la siguiente manera: interacción sitio-familia es significativa para todas las variables; interacción sitio-altura de fuste es significativo solo para E_c y d_f y finalmente la interacción familia-altura de fuste es significativa solo para E_c .

El análisis de residuales indica que los datos satisfacen los supuestos de normalidad y varianza constante y no se reportan datos atípicos. La proporción de variabilidad de cada variable respuesta es explicada por el modelo estadístico mediante el valor de R^2 . Por otra parte, el valor R^2 ajustado indica que el número de factores presentes en el modelo es adecuado, por lo tanto, ambos confirman la validez del ANOVA.

Considerando los valores promedio de las variables obtenidas en la tabla 3 y las comparaciones de medias en las tablas 4 y 5, es posible establecer que las magnitudes y la variabilidad de las propiedades físicas y morfológicas está dentro de rangos que podrían justificar su aplicabilidad con fibra de refuerzo en termoplásticos. Sin embargo, el aprovechamiento comercial del *E. nitens* aplicado por las diferentes industrias madereras chilenas está basado fundamentalmente en la selección y clasificación de la materia prima por sitio y altura de fuste y no por el tipo de familia.

Tabla 2. ANOVA y valor-p para las variables respuesta.

Factor	Valor-p* ($\alpha = 0.05$)					
	E_c	V_c	D_o	l_f	d_f	l_f/d_f
Modelo	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001
Sitio	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	0.0003	0.1546
Familia	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001
Altura de fuste	< 0.0001	< 0.0001	(-)	(-)	< 0.0001	(-)
Sitio - familia	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	0.0013	0.0008	< 0.0001
Sitio - altura de fuste	0.0002	(-)	(-)	(-)	0.0271	(-)
Familia - altura de fuste	0.0015	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)
R^2	0.9862	0.9556	0.6559	0.6255	0.7333	0.6023
R^2 ajustado	0.9620	0.9385	0.6033	0.5674	0.6310	0.5415

E_c : espesor corteza, V_c : volumen corteza, D_o : densidad anhidra, l_f : largo fibra, d_f : diámetro fibra, l_f/d_f : razón largo/diámetro

* Valor-p < 0.05 indica que los términos del modelo son significativos.

* Valor-p > 0.05 ó (-) indica que los términos del modelo no son significativos.

La tabla 3 muestra las propiedades promedio de la corteza de *E. nitens* procedente de 2 sitios, 6 familias, 24 árboles y 168 discos ó rodela analizadas.

Tabla 3. Propiedades promedio para la corteza y fibra de *Eucalyptus nitens* procedente de 2 sitios, 6 familias y 7 alturas de fuste.

Propiedades evaluadas	Promedio	Desviación estandar	Coefficiente de variación (%)
Espesor de corteza, E_c (mm)	4.40	0.94	21.40
Volumen de corteza, V_c (cm ³)	837.88	278.07	30.22
Densidad anhidra, D_o (kg m ⁻³)	757.31	41.52	5.48
Largo de fibra, l_f (μm)	1442.96	153.99	10.67
Diámetro de fibra, d_f (μm)	21.66	1.79	8.26
Razón l_f/d_f	69.14	11.49	16.61

Las tablas 4 y 5 muestran la comparación de medias de las propiedades de la corteza de *E. nitens* procedente de 2 sitios, 6 familias, 24 árboles, producto de estas combinaciones se analizaron 168 discos. El test LSD (Diferencia mínima significativa entre medias) se aplicó entre familias y entre alturas de fuste de un mismo sitio, con un nivel de confiabilidad del 95% ($\alpha = 0.05$).

Tabla 4. Test LSD aplicado para comparación de medias de las propiedades de la corteza y fibra de *Eucalyptus nitens* entre alturas de fuste con diferente familia igual sitio

Sitio	Altura (m)	E_c (mm)	V_c (cm ³)	D_o (kg m ⁻³)	l_f (μm)	d_f (μm)	l_f/d_f
Mulchén	1	6.62 ^a	823.30 ^a	776.74	1473.07	23.18 ^a	64.49
	3	4.37 ^b	775.62 ^a	757.66	1422.19	23.01 ^a	62.26
	6	3.18 ^c	663.84 ^b	789.05	1343.43	20.48 ^b	66.18
	9	2.73 ^c	560.99 ^b	780.18	1313.03	20.40 ^b	64.42
	12	2.73 ^c	453.77 ^b	772.12	1316.88	19.14 ^b	69.94
	15	2.29 ^d	384.75 ^c	773.60	1429.19	20.07 ^b	71.19
Yungay	18	2.05 ^d	292.81 ^d	771.95	1362.36	19.32 ^b	71.56
	1	9.72 ^a	1396.52	716.15	1572.98	23.49	67.38
	3	7.05 ^b	1485.23	745.25	1530.41	22.07	70.40
	6	5.61 ^c	1243.27	726.37	1453.01	22.84	64.35
	9	4.61 ^d	1156.17	753.27	1523.22	21.35	71.70
	12	4.12 ^d	986.37	741.23	1508.07	21.29	71.10
Yungay	15	3.44 ^d	812.59	768.79	1478.88	20.72	71.98
	18	2.77 ^e	695.10	729.97	1474.68	21.65	68.66

E_c : espesor corteza, V_c : volumen corteza, D_o : densidad anhidra, l_f : largo fibra, d_f : diámetro fibra, l_f/d_f : razón largo/diámetro misma letra entre mismo sitio no existe diferencia estadística significativa / distinta letra entre mismo sitio existe diferencia estadística significativa / valores sin letra entre mismo sitio el modelo no es significativo

Tabla 5. Test LSD aplicado para comparación de medias de las propiedades de la corteza y fibra de *Eucalyptus nitens* entre familias a diferente altura de fuste igual sitio.

Sitio	Familia	E_c (mm)	V_c (cm ³)	D_o (kg m ⁻³)	l_f (μm)	d_f (μm)	l_f/d_f
Mulchén	F1	4.30 ^c	717.30 ^b	717.30 ^a	1304.50 ^a	19.37	70.99 ^a
	F2	3.08 ^b	492.87 ^c	729.99 ^a	1354.36 ^a	20.52	66.50 ^a
	F3	3.01 ^b	365.92 ^a	797.29 ^b	1387.83 ^a	21.01	66.98 ^a
	F4	3.42 ^b	676.98 ^b	789.46 ^b	1651.01 ^b	19.70	84.26 ^b
	F5	4.61 ^c	735.67 ^b	767.25 ^c	1272.38 ^c	21.90	58.28 ^c
	F6	2.11 ^a	333.32 ^a	843.54 ^d	1244.01 ^c	22.31	55.87 ^c
Yungay	F1	6.29	1249.97 ^b	740.88 ^a	1595.65 ^b	21.02 ^a	76.08 ^c
	F2	4.37	872.02 ^c	717.90 ^c	1427.19 ^a	20.85 ^a	68.77 ^b
	F3	4.82	693.65 ^c	730.71 ^b	1566.82 ^b	20.22 ^a	78.03 ^c
	F4	5.60	1691.43 ^a	728.77 ^b	1578.44 ^b	23.19 ^b	68.19 ^b
	F5	5.58	1012.70 ^b	756.08 ^a	1449.24 ^a	21.83 ^b	66.79 ^b
	F6	5.35	1144.74 ^b	769.96 ^a	1418.01 ^a	24.39 ^c	58.34 ^a

E_c : espesor corteza, V_c : volumen corteza, D_o : densidad anhidra, l_f : largo fibra, d_f : diámetro fibra, l_f/d_f : razón largo/diámetro misma letra entre mismo sitio no existe diferencia estadística significativa / distinta letra entre mismo sitio existe diferencia estadística significativa / valores sin letra entre mismo sitio el modelo no es significativo

Propiedades de la corteza de *E. nitens* y su potencial aplicabilidad como fibra de refuerzo

Una propiedad física que tiene un rol importante en la tecnología de materiales es el peso específico (PE), ya que con esta propiedad pueden definirse las relaciones resistencia/peso y rigidez/peso, relaciones que son utilizadas como indicadores de efectividad de la fibra. Un valor alto de PE es un indicador de que la corteza posee una buena cantidad de fibra por unidad de volumen lo que resulta beneficioso para aplicaciones como fibra reforzante de termoplásticos, para la corteza de *E. nitens* de este estudio se determinó un valor promedio de PE= 0.757 (Tabla 3).

Yemele *et al.* (2010), reportan para corteza de *Picea mariana* (Black Spruce) y *Populus tremuloides* (Aspen) un PE de 0.639 y 0.707, respectivamente. Con estas fibras ellos obtuvieron buenos resultados en las propiedades mecánicas de un material compuesto en base a una matriz termoplástica de polietileno de alta densidad (HDPE) reforzado con fibra de corteza. Por otra parte, Rozas (2002) en su estudio para

madera de *E. nitens* con edad entre 10 y 11 años procedente de la Región del Bío-Bío (Yungay y Nihuinco), determinó un PE de 0.516 (cercano a la médula) y 0.542 (cercano a la corteza), valores inferiores a los determinados para la fibra de corteza *E. nitens*, lo que indica que la corteza seca, comparativamente, tiene mayor densidad que la madera de la misma especie y otras fibras de corteza y potencialmente mejores propiedades mecánicas como material de refuerzo.

La figura 2 muestra la tendencia de cada variable respuesta respecto a la altura de fuste. Se observó que en general la corteza procedente del sitio Yungay tiene mayores valores de E_c , V_c , l_f , d_f y razón l_f/d_f (figuras 2A, 2B, 2D, 2E y 2F); caso contrario sucedió con la D_o (figura 2C). En las muestras de corteza analizadas en ambos sitios se observó que E_c , V_c , y d_f disminuyen desde la base hacia la copa del árbol (figuras 2A, 2B y 2E), lo que indica un efecto altamente significativo de la variable altura de fuste (tabla 2); lo cual concuerda con los resultados de Quilhó *et al.* (2000) para *Eucalyptus globulus*, donde el espesor de corteza y diámetro de la fibra disminuyen desde la base hacia alturas superiores.

La actividad cambial inicial de las células en el floema y la elongación apical de la fibra durante la diferenciación juegan un rol importante en la longitud de las fibras (Parameswaran y Leise 1974, Ridoutt y Sands 1993, Trockenbrodt 1994). Por otra parte, y de acuerdo a Quilhó *et al.* (2000) el decrecimiento del diámetro de la fibra respecto a la altura fustal podría estar asociado a la concentración de hormonas que disminuyen respecto de la altura de fuste. Debido a que la corteza de *E. nitens* en general, tiene fibras de menor diámetro y más largas en posiciones a mayor altura de fuste; la razón l_f/d_f tiende a ser mayor (figura 2F).

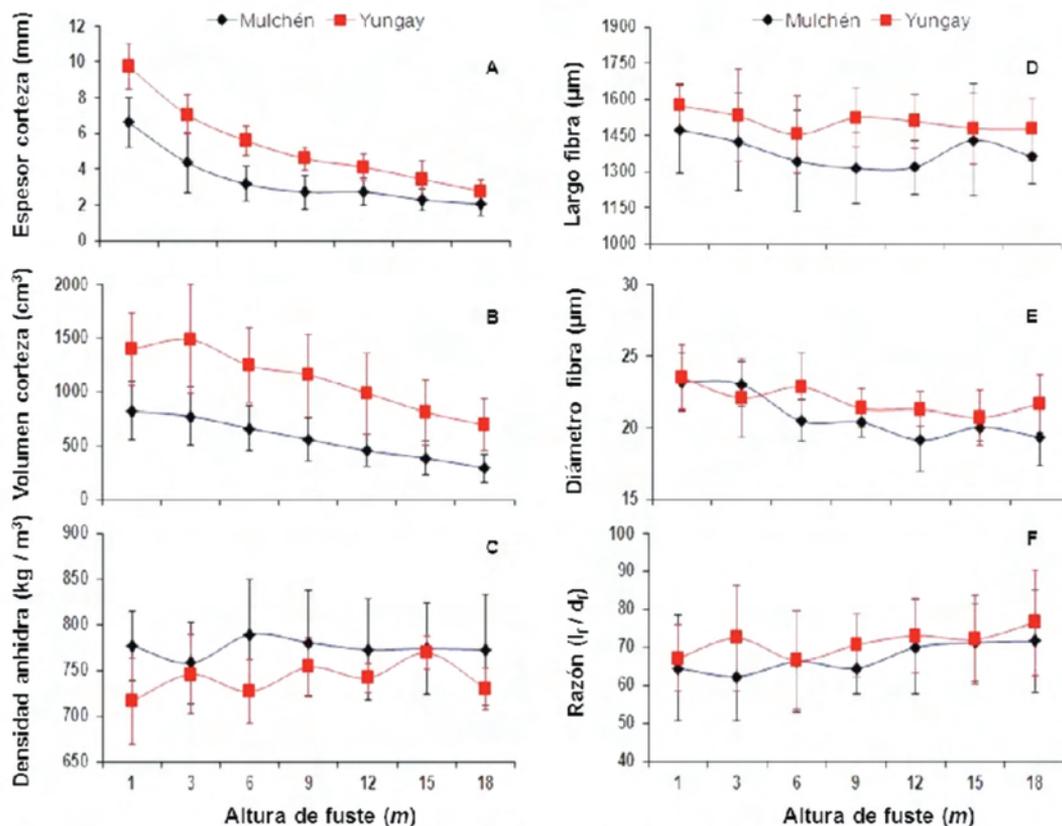


Figura 2. Tendencia promedio de las propiedades de la corteza de *Eucalyptus nitens* por sitio y altura de fuste.

Para el caso de la D_o , l_f y razón l_f/d_f (figuras 2C, 2D y 2F) el efecto de la altura de fuste no es significativo (tabla 2), entonces se considera que la D_o , l_f y razón l_f/d_f de la corteza es la misma a cualquier altura de fuste dentro de un mismo sitio. Rozas (2002), determinó que la densidad en la madera de *E. nitens* disminuye en promedio un 3 % desde la base hasta la altura de 6 m, para luego aumentar casi en forma lineal con la altura del árbol (9 % promedio), comportamiento diferente al presentado por la corteza de *E. nitens* (figura 2C), donde se detectó más bien un comportamiento poco variable de la densidad respecto de la altura de fuste, comportamiento similar al obtenido por Quilhó y Pereira (2001) para corteza de *E. globulus*.

Robinson y Robinson (1994), Rowell *et al.* (2000) y Bouafif *et al.* (2009) sugieren que hay una fuerte correlación entre las propiedades mecánicas de un material compuesto con un incremento de la razón l_f/d_f ya que, esta relación es un indicador potencial de la resistencia mecánica de una fibra. Usar una alta razón l_f/d_f en fibras de madera, aumenta la resistencia del compuesto fibra-termoplástico (Stark y Rowlands 2003). Migneault *et al.* (2008) mostraron que manteniendo constante d_f e incrementando l_f se mejora la resistencia y elasticidad (resiliencia) del compuesto fibra/HDPE. Chen *et al.* (2006) indican que a mayor tamaño de fibra se obtiene una alta resistencia en compuestos fibra/HDPE. Stark y Berger (1997), encontraron que fibras largas (mayores a 250 μm) disminuyen el esfuerzo en tensión del material compuesto.

El ANOVA (tabla 2) indica que, existe un efecto altamente significativo debido a la interacción sitio-familia para la razón l_f/d_f y la comparación de medias entre familias (tablas 4 y 5) a cualquier altura de fuste indica que existen diferencias significativas entre familia; entonces la utilización de la fibra del sitio Yungay (familias 1, 2, 3, 4 y 5) y/o sitio Mulchén (familia 4) como fibra de refuerzo, potencialmente otorgarían las mejores propiedades al material compuesto en cuanto a resistencia, esfuerzo y dureza, lo anterior asociado al valor promedio más alto de razón l_f/d_f encontrado en ambos sitios.

En un proceso de extrusión, utilizar partículas de gran tamaño es complicado, especialmente cuando el perfil extruido tiene poco espesor, dado que un valor alto para l_f produce un efecto altamente significativo en las propiedades de torque en el proceso de extrusión. Respecto a la longitud más conveniente para este proceso Robinson y Robinson (1994) indican que l_f puede variar entre 0.2-1.0 mm. Esto fue confirmado por Martínez *et al.* (2000), Bos *et al.* (2006) y Migneault *et al.* (2008) que obtuvieron buenos resultados usando fibra corta, facilitando el mezclado con HDPE en el proceso de extrusión, mejorando la resistencia y dureza del compuesto fibra-termoplástico y logrando una compatibilidad efectiva en la interfase fibra/matriz. Por lo tanto, los resultados y el potencial de utilización son prometedores si se considera que la l_f promedio de la corteza de *E. nitens* es 1.4 mm (tabla 3); además el sitio y la altura de fuste no son factores significativos para la razón l_f/d_f , lo cual indica que la corteza tiene el mismo comportamiento en los dos sitios y en las 7 alturas estudiadas (tabla 2 y figura 2F).

Se realizó una “optimización” numérica usando el software estadístico Design Expert® para cada una de las variables mostradas en la tabla 6. Cada variable fue maximizada para identificar la combinación de sitio, familia y altura de fuste que cumple con ese valor máximo.

Tabla 6. Optimización numérica para identificar el sitio, familia y altura de fuste que satisfacen la condición de maximización de cada una de las variables.

Factores			Propiedades al maximizar la variable					
Sitio	Familia	Altura (m)	E_c (mm)	V_c (cm ³)	D_o (kg m ⁻³)	l_f (μm)	d_f (μm)	l_f/d_f
Yungay	f5	1	10.84	13.15	756.08	1449.24	23.41	66.79
Yungay	f4	3	7.05	20.84	728.77	1578.44	23.34	68.19
Mulchén	f6	6	2.12	4.12	843.54	1244.01	21.99	55.87
Mulchén	f4	9	2.75	6.93	789.46	1651.01	19.30	84.26
Yungay	f6	1	9.68	14.79	769.96	1418.01	25.97	58.34
Mulchén	f4	12	2.81	5.68	789.46	1651.01	18.03	84.26
Yungay	f1	1	10.72	15.79	740.88	1595.65	22.60	76.08

E_c : espesor corteza, V_c : volumen corteza, D_o : densidad anhidra, l_f : largo fibra, d_f : diámetro fibra, l_f/d_f : razón largo/diámetro
Valor de la variable maximizada destacado en **negrita**

Para el proceso-producto industrial propuesto (extrusión de compuestos plástico-fibra); la mejor condición posible asociada a esta materia prima fibrosa se obtiene con la maximización combinada de tres las variables estudiadas (E_c , V_c y razón l_f/d_f); esta condición resulta de la combinación de corteza procedente del sitio Yungay, familia 1 y altura de fuste a 1 m, siendo la que mejor cumple con esta condición.

Análisis termo-gravimétrico (TGA)

Es conocido que la degradación térmica es uno de los factores limitantes en el uso de fibras naturales como refuerzo en materiales compuestos (De Rosa *et al.* 2010). Por esta razón, la degradación térmica de la fibra de la corteza de *E. nitens* fue estudiada usando TGA. En particular, el comportamiento de degradación térmica a alta temperatura de la fibra de corteza fue estudiada usando curvas TG (análisis termo-gravimétrico) y DTG (análisis diferencial termo-gravimétrico), como se describe en la figura 3.

El análisis TG reportó una pérdida de masa en etapas para las muestras de corteza de *E. nitens*. Alrededor de 90 °C se observaron pérdidas de masa debido a la evaporación de humedad y algunos componentes volátiles a una tasa de degradación promedio de 0.030 %/°C; en una segunda etapa entre 250-360 °C la pérdida de masa es debida a la descomposición de los constituyentes lignocelulósicos, principalmente celulosa, hemicelulosas y lignina a una tasa de degradación promedio de 0.40 %/°C. El rango de temperaturas de degradación térmica para celulosa, hemicelulosas y lignina de este estudio, son similares a las obtenidas por Yemele *et al.* (2010) con la corteza de *P. tremuloides* (Aspen) y *P. mariana* (Black Spruce).

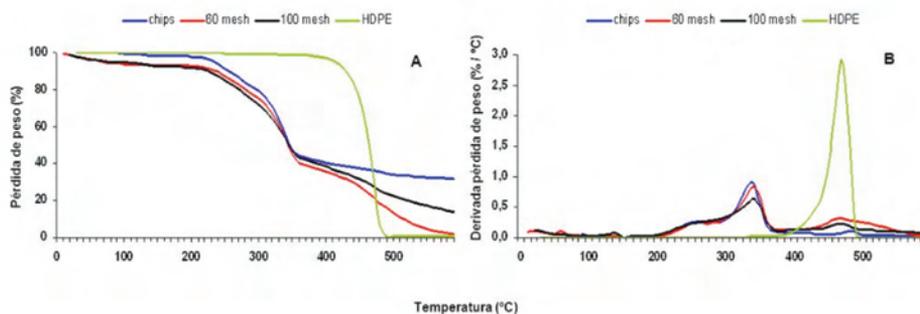


Figura 3. Tendencia del comportamiento termo-gravimétrico de la corteza de *Eucalyptus nitens* y HDPE

A. Curva termo-gravimétrica (TG) y **B.** Derivada de la curva termo-gravimétrica (DTG).

Para corteza de *Acacia nilotica* (Babool), Saini *et al.* (2010) obtuvieron una pérdida de peso de aproximadamente del 10 % a 220 °C, atribuida a la pérdida de humedad seguido por descomposiciones mayores. A esa misma temperatura la corteza de *E. nitens* estudiada alcanza solo un 3 % de pérdida de peso por degradación, para luego alcanzar una pérdida de peso del 10 % alrededor de los 264 °C (figura 3A).

Por otro lado, la corteza de *A. nilotica*, tiene una pérdida de peso del 24 % a los 600 °C, mientras que la corteza de *E. nitens* presentó una pérdida de peso del 29 % a los 595 °C. Estos resultados indican, que alrededor de los 200 °C la fibra de corteza de *E. nitens* tiene una mejor estabilidad térmica que la fibra de corteza de *A. nilotica*, pero esta última se comporta mejor a temperaturas elevadas. La comparación no es crítica para la fibra de corteza de este estudio, dado que los procesos de extrusión, que por ejemplo combinan fibra natural y HDPE, se realizan a temperaturas no mayores a 180 °C. Por lo tanto, y de acuerdo a los resultados obtenidos en el análisis TGA, la fibra de corteza de *E. nitens* no presentaría problemas de degradación térmica significativos en un eventual proceso de extrusión y/o inyección.

La tasa de descomposición promedio de la fibra de corteza de *E. nitens* a 200 °C es aproximadamente de 0.029 %/°C, es decir, existe poca pérdida de masa por cada grado de aumento en temperatura (figura 3B). La curva DTG reveló dos etapas de descomposición después de 80 °C; la primera descomposición térmica aproximadamente a 265 °C, donde principalmente se degradan las hemicelulosas, y la otra etapa es la degradación máxima de la celulosa que ocurrió alrededor de 345 °C y a una tasa de degradación de 0.8006 %/°C. Las hemicelulosas son menos estables térmicamente que la celulosa, por lo tanto, su degradación ocurre a temperaturas más bajas.

Mediante análisis TG, Amigó *et al.* (2008) reportan para fibras naturales de lino, algodón, cáñamo y kenaf, una temperatura crítica de degradación en el rango 320-350 °C y para la fibra de sisal 275 °C, temperaturas de degradación similares a las obtenidas para la fibra de corteza de *E. nitens*. Los resultados obtenidos con la corteza de este estudio concuerdan con los de Yang *et al.* (2005) quienes indican que los materiales naturales lignocelulósicos se descomponen térmicamente entre 150-500 °C y particularmente las hemicelulosas se degradan entre 150-350 °C, la celulosa entre 275-350 °C y la lignina a una temperatura entre 250-500 °C.

Un factor de mucha influencia en las propiedades finales del compuesto es la degradación térmica de la fibra. A pesar de esto, y desde el punto de vista del potencial del material lignocelulósico aquí estudiado, se puede establecer que la compatibilidad térmica entre un termoplástico como el HDPE y la fibra de *E. nitens* es completamente factible, ya que, para obtener un perfil extruido las temperaturas de proceso no excederían de los 180 °C, temperatura menor a la degradación térmica tanto de la fibra de corteza de *E. nitens* y del termoplástico HDPE.

En particular la muestra de HDPE, utilizada como un material de comparación, presentó una buena estabilidad térmica entre 390-400 °C y una tasa de pérdida de masa por cada grado de aumento en la temperatura entre 0.06-0.1 %/°C. A partir de los 400 °C, el termoplástico sufre una degradación acelerada hasta alcanzar su temperatura máxima de degradación de sus cadenas poliméricas alrededor de los 470 °C a una tasa de degradación de 2.90 %/°C. El comportamiento térmico del HDPE Ivorex 7000 F, es comparable a los resultados obtenidos por Kim *et al.* (2004), Monasterio *et al.* (2008) y Yemele *et al.* (2010) con HDPE de similares características.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en propiedades físicas de la fibra de la corteza de *Eucalyptus nitens* como, espesor (4.4 mm), peso específico (0.757), propiedades morfológicas como la razón l_f/d_f (69.14) y porcentaje de presencia de fibra (45%), sumado a la buena estabilidad térmica de la fibra de la corteza a temperaturas de degradación alrededor de 200 °C, indican que, es posible considerar a las fibras de corteza de *E. nitens* como una opción para ser usadas como fibra de refuerzo en una matriz termoplástica como el polietileno de alta densidad (HDPE).

Un rendimiento efectivo de una determinada fibra natural depende de sus propiedades físicas, térmicas y morfológicas, ya que, estos son algunos de los factores que pueden afectar el buen desempeño de las fibras lignocelulósicas en un material compuesto. Esta información es fundamental en la exploración de las propiedades de fibras naturales como material de refuerzo en matrices termoplásticas. Se encontraron diferencias estadísticamente significativas en el comportamiento de la fibra de la corteza respecto del sitio, familia y altura de fuste.

Sin embargo, aunque dichas diferencias justifican el aprovechamiento industrial selectivo sobre determinado sitio, altura de fuste y familia; finalmente la propuesta es utilizar la materia prima procedente del proceso de descortezado industrial, en donde, se dificultaría en algún grado obtener una clasificación selectiva de la fibra de corteza como material de refuerzo.

AGRADECIMIENTOS

Al Centro de Investigación de Polímeros Avanzados (CONICYT REGIONAL/CIPA/R08C1002), Centro de Biomateriales y Nanotecnología (CBN), Laboratorio de Anatomía de la Madera y Laboratorio de Microscopía Electrónica, de la Universidad del Bío-Bío, por el apoyo logístico y de equipos. A Forestal Mininco por facilitar el material de estudio. Al Tecnológico de Costa Rica (TEC), a la Organización de los Estados Americanos (OEA) y al programa de Doctorado en Ciencias e Industrias de la Madera de la Universidad del Bío-Bío, por el apoyo económico de becas.

REFERENCIAS

- Amigó, V.; Salvador, M.; Nuez, A.; Sahuquillo, O.; Llorens, R.; Martí, F. 2008.** Caracterización de fibras vegetales utilizadas como refuerzo en matrices termoplásticas. En: X Congreso Nacional de Materiales. Mondragon Unibertsitatea-Kursaal. Donostia-San Sebastián, España. Junio. 4 p. Disponible en <http://www.upv.es/VALORES/Publicaciones/CNM08_Fibras_naturales.pdf> [consultado 17 Febrero 2011]
- Bos, H.; Müssig, J.; van der Oever, M. 2006.** Mechanical properties of short-flax-fibre reinforced compounds. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 37(10):1591-1604
- Bouafif, H.; Koubaa, H.; Perré, P.; Cloutier, A. 2009.** Effects of fiber characteristics on the physical and mechanical properties of wood plastic composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 40(12):1975-1981
- Chen, H.; Chen, T.; Hsu, C. 2006.** Effects of wood particle size and mixing ratios of HDPE on the properties of the composites. *Holz als Roh-und Werkstoff* 64(3):172-177
- De Rosa, I.; Kenny, J.; Puglia, D.; Santulli, C.; Sarasini, F. 2010.** Morphological, thermal and mechanical characterization of okra (*Abelmoschus esculentus*) fibres as potential reinforcement in polymer composites. *Composites Science and Technology* 70(1):116-122
- Gacitúa, W.; Wolcott, M. 2009.** Morphology of wood species affecting wood-thermoplastics interactions: Microstructure and mechanical adhesion. *Maderas. Ciencia y Tecnología* 11(3): 217-231

Geldres, E.; Gerding, V.; Schlatter, J. 2006. Volumen de *Eucalyptus nitens* de 4-7 años de edad en un rodal de la X Región, Chile. *Bosque* 27(3): 223-230

Grobbelaar, F.; Manyuchi, K. 2000. Eucalypt debarking: an international overview with a Southern African perspective. Forest Engineering Southern Africa (FESA) 68 p. Disponible en <<http://www.yourday2day.com/site2/icfrfiles/publication/FESA/Eucalypt%20debarking.PDF>> [consultado 28 Septiembre 2011]

Harper, D.; Wolcott, M. 2004. Interaction between coupling agent and lubricants in wood-polypropylene composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 35(3): 385-394

INFOR. Instituto Forestal. 2008. Series y estadísticas. Disponible en <<http://www.infor.cl/es/series-y-estadisticas.html>> [consultado 05 Septiembre 2010]

Igartúa, D.; Monteoliva, S.; Monterubbiansi, M.; Villegas, M. 2003. Basic density and fibre length at breast height of *Eucalyptus globulus* ssp. *Globulus* for parameter prediction of the whole tree. *IWA Journal* 24(2): 173-184

Jorge, F.; Quilhó, T.; Pereira, H. 2000. Variability of fibre length in wood and bark in *Eucalyptus globulus*. *IWA Journal* 21(1):41-48

Jane, F. 1970. *The structure of wood*. Adam & Charles Black. London, UK. 478 p

Kibblewhite, R.; Ridell, M.; Shelbourne, C. 2000. Variation in wood, kraft fibre, and handsheet properties among 29 trees of *Eucalyptus regnans*, and comparison with *Eucalyptus nitens* and *E. fastigata*. *New Zealand Journal of Forestry Science* 30(3):458-474

Kim, H.S.; Yang, H.S.; Kim, H.J.; Park, H.J. 2004. Thermogravimetric analysis of rice husk flour filled thermoplastic polymer composites. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 76: 395-404

López, C. 2006. *Eucalyptus nitens*: Una alternativa que se proyecta. *Lignum Bosque-Madera & Tecnología* 90:39-41

Martin, R.; Crist, J. 1970. Elements of bark structure and terminology. *Wood and Fiber Science* 2(3):269-279

Martínez, L.; López Manchado, M.; Vázquez, A.; Arroyo, M. 2000. Efecto de distintos tipos de fibra corta en las propiedades mecánicas de las mezclas de polipropileno/polietileno. En: IV Coloquio Latinoamericano de Fractura y Fatiga. Jornadas SAM 2000. Argentina. Agosto. p.1017-1024. Disponible en <<http://www.materiales-sam.org.ar/sitio/biblioteca/neuquen/Trabajos/1401.PDF>> [consultado 17 Febrero 2011]

Migneault, S.; Koubba, A.; Erchiqui, F.; Chaala, A.; Englund, K.; Krause, C.; Wolcott, M. 2008. Effect of fiber length on processing and properties of extruded wood-fiber/HDPE composites. *Journal of Applied Polymer Science* 110(2):1085-1092

Monasterio, F.; Destéfanis, H.; Erdmann, E. 2008. Retardo de la degradación del HDPE mediante el agregado de nanocompuestos. En: 2º Encuentro de Jóvenes Investigadores en Ciencia y Tecnología de Materiales. Asociación Argentina de Materiales (SAM). Posada-Misiones-Argentina. Octubre. 6p. Disponible en <<http://www.materiales-sam.org.ar/sitio/biblioteca/jovenesSAM08/>> [consultado 11 Julio 2011].

Nabi, D.; Jog, P. 1999. Natural Fiber Polymer Composites: A review. *Advances in Polymer Technology* 18(4):351-363

Parameswaran, N.; Liese, W. 1974. Variation of cell length in bark and wood of tropical trees. *Wood Science and Technology* 8 (2): 81-90

Quilhó, T.; Pereira, H.; Richter, H. 2000. Within-tree variation in phloem cell dimensions and proportions in *Eucalyptus globulus*. *IWA Journal* 21 (1):31-40

Quilhó, T.; Pereira, H. 2001. Within and between-tree variation of bark content and wood density of *Eucalyptus globulus* in commercial plantations. *IAWA Journal* 22 (3):255-265

Ridoutt, B.; Sands, R. 1993. Within-tree variation in cambial anatomy and xylem cell differentiation in *Eucalyptus globulus*. *Trees* 8 (1):18-22.

Robinson, I.; Robinson, J. 1994. Review: The influence of the fibre aspect ratio on the deformation of discontinuous fibre-reinforced composites. *Journal of Materials Science* 29(18): 4663-4677

Rowell, R.; Han, J.; Rowell, J. 2000. Characterization and factors effecting fiber properties. In: Natural polymers and agrofibers based composites: preparation, properties and applications. Eds. Elisabette Frollini, A.L Leão and Luiz Henrique Capparelli Mattoso. IQSC/USP, UNESP and Embrapa Instrumentação Agropecuária. São Carlos-SP, Brazil. 115-134. Disponible en <<http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/pdf2000/rowel00b.pdf>> [consultado 17 Febrero 2011].

Rozas, C. 2002. Resultados Tecnológicos Proyecto FONDEF D9811018: Diversificación y aprovechamiento de las plantaciones de *Eucalyptus globulus* y *Eucalyptus nitens* para su utilización en la industria del mueble. Universidad del Bío-Bío. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería en Maderas. 108p.

Saini, G.; Bhardwaj, R.; Choudhary, V.; Narula, A. 2010. Poly(vinyl chloride)-Acacia bark flour composite: Effect of particle size and filler content on mechanical, thermal, and morphological characteristics. *Journal of Applied Polymer Science* 117(3): 1309-1318

Sewda, K.; Maiti, S. 2007. Mechanical properties of HDPE/bark flour composites. *Journal of Applied Polymer Science* 105(5): 2598-2604

Sewda, K.; Maiti, S. 2009. Mechanical properties of teak wood flour-reinforced HDPE composites. *Journal of Applied Polymer Science* 112(3): 1826-1834

Stark, N.; Berger, M. 1997. Effect of particle size on properties of wood-flour reinforced polypropylene composites. In: Fourth International Conference on Woodfiber-Plastic Composites. Madison-WI, USA. Forest Products Society. May. 134-143. Disponible en <<http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/pdf1997/stark97d.pdf>> [consultado 17 Febrero 2011].

Stark, N.; Rowlands, R. 2003. Effects of wood fiber characteristics on mechanical properties of wood/polypropylene composites. *Wood and Fiber Science* 35(2):167-174

Suresh, M.; Srikanth, G.; Biswas, S. 2009. Thermoplastic Composite-Technology & Business Opportunities. Technology Information, Forestcasting and Assessment Council (TIFAC). Department of Science and Technology. Govt. of India. 9p. Disponible en <http://www.tifac.org.in/index.php?option=com_content&view=article&id=535:thermoplastic-composites-technology-a-business-opportunities&catid=85:publications&Itemid=952> [consultado 25 Diciembre 2010].

Taj, S.; Ali Munawar, M.; Khan, S. 2007. Review: Natural fiber-reinforced polymer composites. *Proceedings Pakistan Academy Science* 44(2): 129-144

Trockenbrodt, M. 1994. Quantitative changes of some anatomical characters during bark development in *Quercus robur*, *Ulmus glabra*, *Populus tremula* and *Betula pendula*. *IAWA Bulletin* 15 (1): 387-398

Velásquez, B. 2006. Situación de los sistemas de aprovechamiento de los residuos forestales para su utilización energética. *Ecosistemas* 15(1): 77-86

Yang, H.; Wolcott, M.; Kim, HS.; Kim, HJ. 2005. Thermal properties of lignocellulosic filler-thermoplastic polymer bio-composites. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 82(1): 157-160

Yemele, M.; Koumba, A.; Cloutier, A.; Soulonganga, P.; Wolcott, M. 2010. Effect of bark content and size on the mechanical properties of bark/HDPE composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 41(1): 131-137