



Caracterización dasométrica y químico - micrográfica de tres especies de pino y su viabilidad de aprovechamiento integral

Teófilo Escoto García^{1*}

Nelson Beas Beas²

Héctor Jesús Contreras Quiñones¹

Antonio Rodríguez Rivas¹

Sara Gabriela Díaz Ramos¹

José Anzaldo Hernández¹

Raúl Vega Elvira²

¹ Departamento de madera celulosa y papel de la Universidad de Guadalajara.
México.

² Facultad de Ciencias Químicas CUCEI de la Universidad de Guadalajara. México.

*Autor por correspondencia, email: tescoto@dmcyp.cucei.udg.mx



Resumen:

Se evaluaron tres especies de pino: *Pinus douglasiana*, *Pinus devoniana* y *Pinus oocarpa*, de una parcela ubicada en el bosque La primavera, Jalisco. Después de realizar las mediciones dasométricas y establecer el balance de biomasa (madera, ramas, corteza y acículas), las muestras de la madera del tronco se prepararon para su análisis químico, de acuerdo a métodos TAPPI. Con respecto al estudio dasométrico y balance de biomasa dado aquí, se sugiere que la viabilidad de aprovechamiento de los pinos estudiados fue el siguiente: *P. douglasiana* con el mayor contenido en biomasa (45 %), puede ser aplicado en diversos productos madereros (muebles, estructuras y laminados); para aplicaciones de la corteza (fenoles y taninos) se recomienda a *P. devoniana* con el contenido más alto en corteza (23 %), y para el caso de las acículas (clorofila y esencias) se propone a *P. oocarpa* (22 %). Por otro lado, el efecto de la composición química de la madera (holocelulosa 75.4 %, alfa celulosa 48.1 % y pentosanos 12.1 %) y de la morfología fibrosa (largo de fibra de 3.5 a 4.0 mm) sobre las propiedades fisicomecánicas en hojas de papel estándar, fue significativamente mejor en *P. devoniana*, lo cual la sugiere como la más viable para la obtención de pulpa y fabricación de papel Kraft.

Palabras clave: Dasometría, morfología fibrosa, *Pinus douglasiana* Martínez, *Pinus devoniana* Lindl., *Pinus oocarpa* Schiede ex Schltldl., propiedades fisicomecánicas del papel.

Fecha de recepción/ Reception date: 14 de marzo de 2017.

Fecha de aceptación/ Acceptance date: 19 de mayo de 2017



Introducción

México cuenta con una superficie de 167 817.47 km² de bosques, de la cual 80 % son pinos utilizados para madera y celulosa (Inegi, 2013). Desde un punto de vista global, la madera representa de 85 a 90 % de las materias primas fibrosas consumidas para fabricar diversos tipos de productos tanto en la industria maderera, como en la de la celulosa, papel y embalajes (Gellerstedt, 2009).

Las especies del género *Pinus* crecen, preferentemente, en los bosques de coníferas del hemisferio norte y se estima que en México existe el mayor número de taxa, 75 de los 110 que se distribuyen en el mundo. Eguiluz (1998) indica que su principal área de distribución se localiza en la Sierra Madre Occidental, Sierra Madre Oriental, Sierra Madre del Sur y Eje Neovolcánico (Figura 1).



Fuente: Cotler, 2007.

Figura 1. Distribución de las especies de *Pinus* en México.

Entre las características de los pinos, que pertenecen a las coníferas de madera blanda, resinosa y no porosa, se pueden citar: plantas leñosas (Figura 2) que se reproducen por medio de semillas ubicadas entre las escamas de los conos femeninos (Perry, 1991). Las acículas, por lo regular tienen valor taxonómico; por ejemplo, existen pinos que presentan de 2 a 3 acículas, los cuales son árboles productores de madera sólida resinosa, con corteza que se resquebraja o se levanta en escamas, conos erectos de escamas engrosadas y semillas con ala articulada; en tanto que las especies de cinco acículas, agrupan a individuos productores de madera menos sólida, poco resinosa, piñas un tanto péndulas de escamas poco engrosadas en su ápice y con un ombligo marginal (Martínez, 1992).



Fuente: Ciencia y Biología, 2017; Wordpress, 2017.

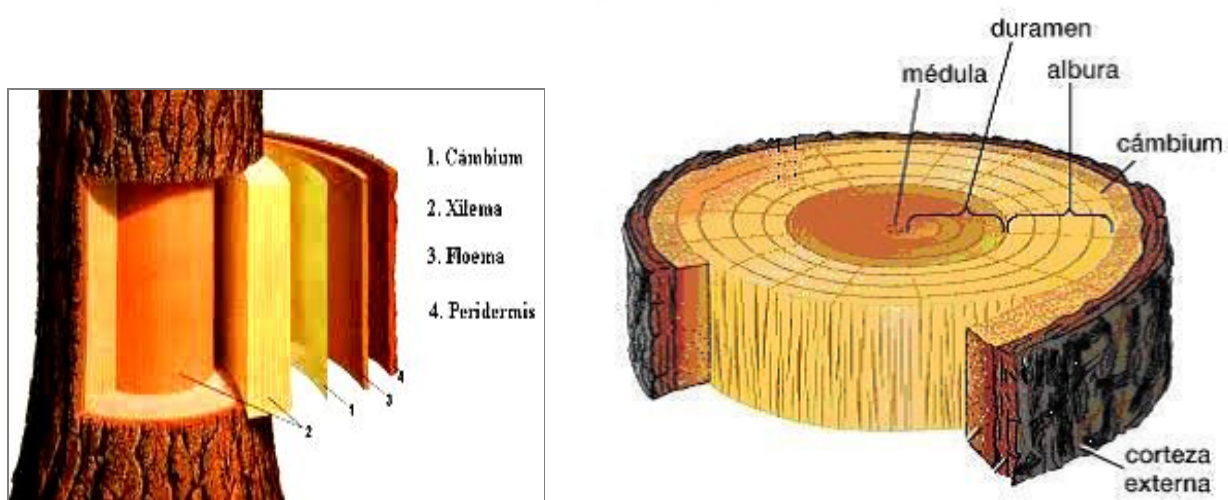
Figura 2. Acículas, piña y semillas del género *Pinus*.

En relación a los taxa estudiados en la presente investigación, algunas de sus características son: *Pinus douglasiana* Martínez nativo de México que llega a medir 35 m de altura y 70 cm de diámetro, con copa piramidal y crece en los estados de Sonora, Chihuahua, Durango, Sinaloa, Tepic, Jalisco, Michoacán, Guerrero y Oaxaca; a una altitud media de 2 000 m y temperatura de 15 a 18 °C (Martínez, 2013).

Pinus devoniana Lindl. (Sin. *Pinus michoacana* Martínez), alcanza una altura de 30 m y 90 cm de diámetro, ramificado con copa redondeada; se distribuye en Nayarit, Jalisco, Zacatecas, Colima, Michoacán, Estado de México, Puebla, Hidalgo, Guanajuato, Tlaxcala, Guerrero, Oaxaca, Veracruz y Chiapas. Crece a una altitud media de 1 900 m y temperatura media de 18 °C (Aguilera, 2001).

Pinus oocarpa Schiede ex Schltl. (pino ocote), nativo de México, hasta 18 m de altura y 40 cm de diámetro, copa ampliamente ramificada; se ha registrado en Sonora, Sinaloa, Zacatecas, Durango, Nayarit, Jalisco, Michoacán, Morelos, Puebla, Hidalgo, Tlaxcala, Guerrero, Oaxaca y Chiapas; crece a una altitud media de 1 800 m, con temperaturas de 13 a 23 °C (Gutiérrez *et al.*, 2013).

Entre las características promedio del fuste de los pinos (biomasa maderable), Olvera (1981) cita que tiene una altura de 15 a 45 m y de 25 a 100 cm de diámetro, con fuste vertical y ramas horizontales, cuya longitud varía desde la base del tronco hasta el ápice; en general son de silueta cónica. En la sección transversal del tronco (Figura 3), se localizan las siguientes secciones: corteza exterior o peridermis, corteza interior denominada floema o líber, cambium o tejido vivo, albura y duramen llamados en conjunto xilema o madera útil.

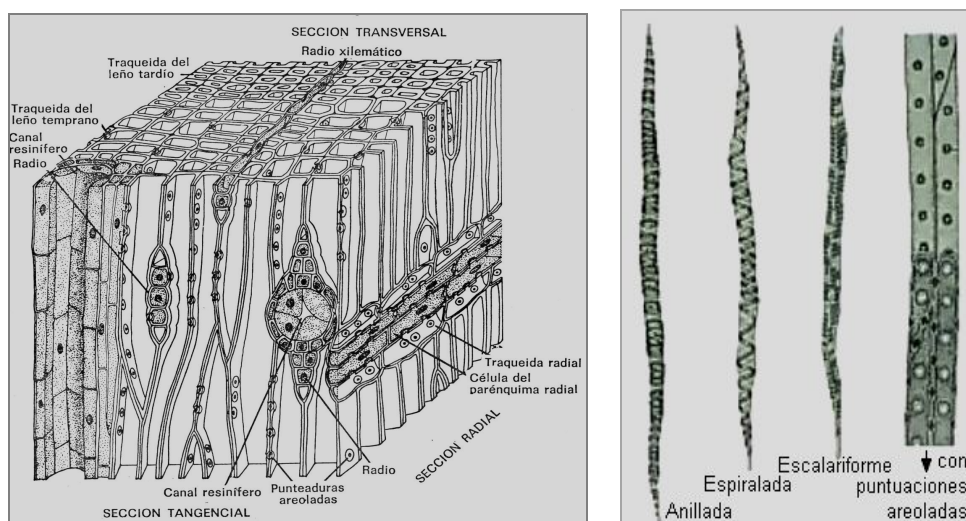


Fuente: González, 2013a; Rodríguez, 2014.

Figura 3. Secciones o capas que componen el tallo de los pinos.

En cuanto a la constitución del tejido celular, la madera de coníferas presenta una composición celular simple, así como una menor especialización celular, en comparación con la de las latifoliadas o maderas duras, las cuales poseen una gran diversidad de fibras, traqueidas, vasos, células parenquimatosas, etcétera. El tejido de las coníferas (Figura 4) está compuesto de tres tipos de células: fibras y traqueidas (80 - 90 %), células parenquimatosas y radios leñosos (10 a 20 %).

Las traqueidas tienen la función de conducir el agua y de sostén en el tejido vegetal, se conectan entre sí mediante perforaciones en la pared celular denominadas puntuaciones areoladas, que sirven para el flujo de líquidos. Miden entre 1.5 y 3.8 mm, dependiendo de la especie y de la zona de crecimiento (Olvera, 1985). Por otro lado, las células parenquimatosas y radios leñosos se caracterizan por presentar contenido celular, forma prismática y están orientadas horizontal y verticalmente en el tejido celular de la madera (Figura 4); su función es almacenar, transformar y conducir sustancias en la madera a través de punteaduras que las conectan con las células vecinas (Fengel y Wegener, 1989).



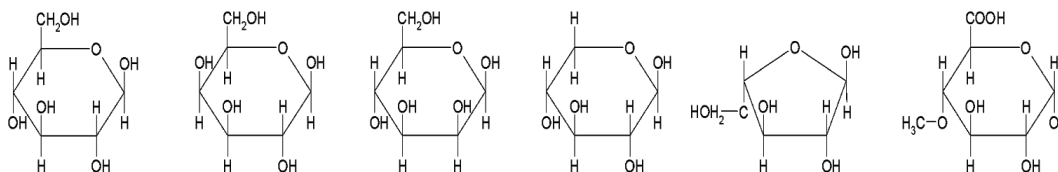
Fuente: Universidad Nacional del Nordeste, 2000; González, 2013b.

Figura 4. Detalle del tejido y traqueidas del *Pinus*.

Con respecto a lo anterior, es importante señalar que la composición fibrosa y química de las materias primas utilizadas en la fabricación de papel y cartón, en el ámbito mundial, privilegian las especies de *Pinus* y coníferas como fuente de fibras básicas para proporcionar resistencia estructural (fibras y traqueidas) a la mayoría de los papeles para escritura e impresión, hasta en 50 %, y para el caso de papeles de embalaje con alta resistencia fisicomecánica, normalmente, se usa de 80 a 100 % de fibras de pino (Zanuttini *et al.*, 2008).

En el caso de los componentes químicos presentes en los pinos y coníferas, los carbohidratos integran la mayor parte de la biomasa del tallo vegetal (corteza, madera, ramas y hojas); compuestos que no pueden separarse sin afectar la estructura física de la pared celular (Timell, 1967).

La fracción de carbohidratos, holocelulosa (68 a 90 %), está compuesta por celulosa y hemicelulosa, a su vez integradas por hexosanos y pentosanos (Ávila y Herrera, 2012). Químicamente, la celulosa es un polisacárido con estructura lineal, constituida por moléculas de glucosa (β -D-glucopiranosas unidas mediante enlaces β -1,4), con fórmula empírica $C_6H_{10}O_5$ (Sjöstrom, 1993); y los carbohidratos de bajo peso molecular (Figura 5) son polisacáridos compuestos por más de un tipo de monómero unidos por enlaces β (1-4) que forman una cadena lineal ramificada junto con la celulosa y, a su vez, forman parte de la red de microfibrillas que configuran la pared celular de los tejidos (Rowell, 2005).

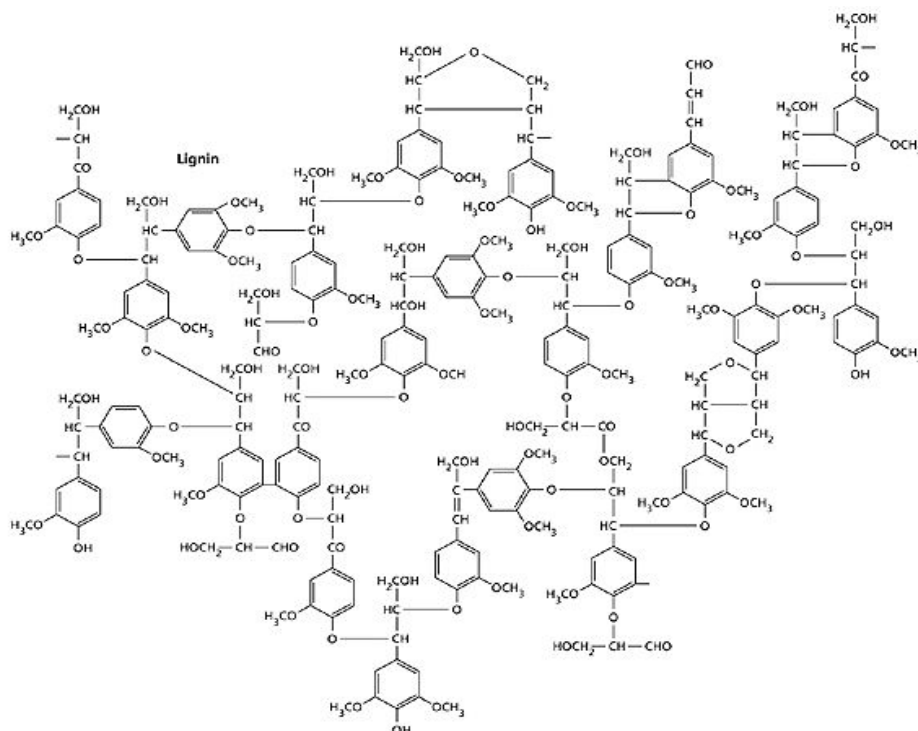


Fuente: Chapa, 2011.

Figura 5. Fracción de carbohidratos

En el caso de la aplicación de celulosa y carbohidratos, Álvarez-Castillo *et al.* (2012) sugieren la obtención de *Whiskers* y diversos materiales compuestos a partir de celulosa, y plantean producir bioetanol de los carbohidratos monoméricos.

Después de los polisacáridos, la lignina es el polímero orgánico más abundante en el mundo vegetal (15 a 35 %), en la madera cumple múltiples funciones, entre ellas la de actuar como un cemento interfibrilar, que además de pegar y unir, proporciona rigidez a la pared celular y resistencia a los tejidos, impidiendo el ataque de microorganismos y la penetración de enzimas destructivas (Rowell, 2005). Los polímeros de la lignina son estructuras transconectadas con un peso molecular de 10 000 unidades atómicas; son la unión de varios ácidos y alcoholes fenilpropílicos que forman diversas estructuras poliméricas (Figura 6). Por esta razón, no es posible definir una estructura de la lignina; sin embargo se han propuesto diversos modelos que la representan (Sjöstrom, 1993).

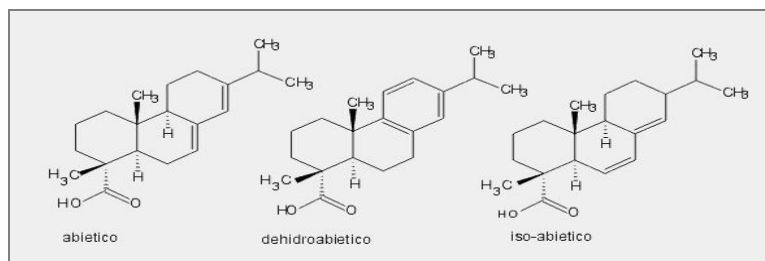


Fuente: García, 2015.

Figura 6. Polímero de lignina.

Chávez-Sifontes y Domine (2013) indican que la lignina puede tener aplicaciones como lignosulfonatos (dispersante de pesticidas, emulsificante y secuestrador de metales pesados), como polímero o copolímero (resinas tipo fenol - formaldehído, o poliolefinas - lignina, poliésteres - lignina, poliuretanos - lignina). La lignina también se modifica químicamente y se añade en formulaciones para mejorar las propiedades de resinas o adhesivos.

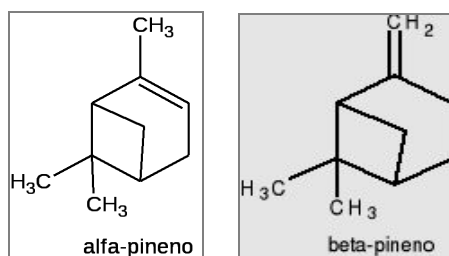
La fracción de extraíbles en los pinos se compone de ácidos resínicos (60 - 75 %), ácidos grasos (15 - 20 %) y una fracción volátil o trementina (5 - 10 %). Los ácidos resínicos (80 %) son compuestos de fórmula general, $C_{20}H_{30}O_2$, que se clasifican de acuerdo con su estructura en dos series: abietano, con un sistema de doble enlace y un grupo isopropílico (sustituyente en el tercer anillo); y pimarano que tienen un grupo vinílico y uno metilo en la misma posición (Figura 7).



Fuente: Hevia *et al.*, 2008.

Figura 7. Principales ácidos resínicos.

Goldstein (2017) señala que el aceite de trementina y la colofonia son los principales productos de este tipo de ácidos resínicos. La fracción de ácidos grasos presentes en los extractos de pinos está compuesta por ácidos formados por 18 átomos de carbono (C18), de ellos predominan el oleico y el linoléico, y en menor proporción el palmítico y el esteárico. Finalmente, la fracción volátil conformada, básicamente, por trementina, aguarrás o aceite de pino (subproducto en el proceso de fabricación del papel), se obtiene al separar por destilación los vapores ligeros de la fracción de ácidos resínicos que está integrada por una mezcla de terpenos con fórmula general, $C_{10}H_{16}$, entre los que destacan el alfa y beta pineno (Figura 8).



Fuente: Erick, 2016.

Figura 8. Principales terpenos.

Con base en lo anterior, el Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (Inegi, 2013) cita que en México hay poca información referente a la composición química en plantaciones específicas de pino, y propone llevar a cabo estudios concretos sobre su dasonomía, taxonomía y composición química básica como las incluidas en esta investigación. Por otro lado, Álvarez-Castillo *et al.* (2012) consignan que de los recursos naturales, los materiales lignocelulósicos juegan un papel muy importante debido a su disponibilidad y a las diversas fuentes que los generan (madera, ramas, hojas, corteza, etcétera), por lo que plantean utilizar la biomasa lignocelulósica en nuevas tendencias de aprovechamiento integral; mediante las cuales los residuos lignocelulósicos pueden ser utilizados para producir fibras de carbón, a partir de lignina; con el método de *Whiskers* usando celulosa; y bioetanol empleando como fuente los carbohidratos y otros biomateriales compuestos.

Rodríguez (1994) documenta que la utilización del bosque y su industrialización propicia la acumulación de altos volúmenes de desechos fibrosos, particularmente corteza, durante el proceso de obtención de celulosa; señala que la corteza se caracteriza por contener extraíbles, sobre todo taninos que son materia prima de muy bajo costo para generar fenoles y compuestos que pueden usarse como absorbentes de metales pesados y para la formación de proteínas. En este sentido, se planteó como primer objetivo hacer un balance de la biomasa desechada de cada especie de pino (ramas corteza y acículas). El segundo fue la determinación de los compuestos químicos en la madera, el análisis micrográfico y las propiedades de resistencia fisicomecánica del papel, para identificar, con base en estos resultados, cuál de las tres especies presenta las mejores características dasométricas, de biomasa aprovechable, de fracciones químicas, características morfológicas y fisicomecánicas para proponer su viabilidad de aprovechamiento integral.

Materiales y Métodos

Se seleccionaron tres árboles de las especies *Pinus douglasiana*, *Pinus devoniana* y *Pinus oocarpa* plantados en 1985, con una densidad de plantación de 2 x 2 m en el campo experimental Bosque Escuela de la Universidad de Guadalajara (Huerta *et al.* 1985), localizado en el bosque La Primavera en la comunidad de Cuxpala, Jalisco, México (Figura 9).

Las condiciones de la zona son temperatura media anual 18.5 °C (4 – 35 °C), clima semicálido y una altitud media de 1 480 m. Su ubicación, determinada por GPS, se encuentra entre las coordenadas 20°34'57.66" N y 103° 37'57.63" O (Escoto *et al.*, 2013). Se midieron las dimensiones dasométricas de cada uno de los especímenes seleccionados: diámetro del tronco (DAP) con cinta diamétrica Sthil 15m, y luego se desramaron para medir la longitud del fuste y, así, determinar su altura con pistola Haga 25 m; se derribaron con motosierra Husquarna modelo 365, enseguida se procedió a cortarlo en diferentes secciones para su mejor manejo, clasificándolos por especie y altura. Las ramas y acículas se colectaron junto con las partes (troncos) del fuste y se trasladaron al departamento de Madera, Celulosa y Papel del Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías de la Universidad de Guadalajara.



Figura 9. Plantación de pinos en el campo experimental Bosque Escuela (Bosque La Primavera, Jalisco).

Los troncos fueron seccionados con motosierra, se midieron y se secaron por dos semanas antes de descortezarlos manualmente; una vez secos y sin corteza se pesaron y midieron (Figura 10). Las ramas y acículas, o follaje, también se pesaron para establecer un balance de material aprovechable de toda la biomasa (fuste, ramas, corteza y acículas) por especie de pino.



Figura 10. Medición, descortezado y secado de los troncos.

A cada una de las fracciones de biomasa (astillas de madera, cortezas, ramas y acículas) se les determinó el contenido de humedad de acuerdo a la técnica TAPPI T 257 cm-85, para obtener el peso en base seca y establecer las fracciones aprovechables, con respecto a la biomasa total y hacer el balance por taxón estudiado (TAPPI, 1998).

Los troncos descortezados, se astillaron en un equipo *Bruks Mekaniska* tipo 980 AH, posteriormente, se llevó a cabo la clasificación de astillas con un equipo *Lorentzen & Wettre* tipo FI-117, en placa ranurada de 10 mm y 8 mm, y en placa con orificios de 10 mm de diámetro. La fracción de astillas retenidas entre las placas ranuradas de 10 y 8 mm, se utilizaron para obtener pulpa mediante el proceso *Kraft* para fabricar papel en laboratorio. La fracción de astillas finas, se molieron en un molino de

martillos *Retsch GmbH 5657 SKI*, el aserrín se clasificó en un equipo *Rotap W.S. Tyler Rx-29* con mallas 20, 40, 60, 100, 120, de acuerdo a los métodos TAPPI (TAPPI, 1998).

Las muestras de aserrín retenidas en la malla 60 se analizaron en el laboratorio de calidad de fibras del departamento de Madera Celulosa y Papel de la Universidad de Guadalajara (UDG), para lo cual se siguieron los métodos T 264 cm-97 preparación de la muestra libre de sustancias extraíbles, T 204 cm-97 determinación del contenido de compuestos extraíbles en alcohol / tolueno y T 207 cm-99 determinación del contenido de compuestos extraíbles en agua caliente (TAPPI, 1998).

Extraído el aserrín, se hicieron las determinaciones de holocelulosa (carbohidratos totales) según método *Wise* con ácido acético y clorito de sodio; a continuación se realizó la determinación de alfa - celulosa, según la norma T 9 m-54 descrita por *Cross y Bevan*, mediante la hidrólisis de las hemicelulosas con ácido sulfúrico al 3 %, y finalmente la determinación de los pentosanos por destilación y titulación del furfural con ácido clorhídrico, con base en la norma T 223 cm-84 (TAPPI, 1998).

La lignina *Klason* se aisló de acuerdo a la norma T 222 om-98 por hidrólisis de los carbohidratos con ácido sulfúrico al 78 %. La determinación de las cenizas se hizo según lo estipulado en la norma T 211 om-93, se carbonizó, en principio, el aserrín en un crisol de porcelana y luego se incineró en una mufla *Felisa M3600* a 575 ± 25 °C por un periodo de 3 horas (TAPPI, 1998).

El análisis micrográfico correspondiente a la longitud de fibra (30 mediciones por especie) se realizó en el laboratorio de Microscopia del departamento de Madera Celulosa y Papel de la UDG, sobre muestras desfibradas de papel estándar en microscopio electrónico *Wild Heerbrugg M29799*.

La determinación de las propiedades fisicomecánicas en hojas de papel estándar, se llevó a cabo en los laboratorios de Refinación de Pulpa y Tecnología del Papel, del Departamento de Madera Celulosa y Papel de la UDG, de acuerdo con las normas T

205 sp-95 formación de hojas estándar, T 414 om-98 resistencia al rasgado, T 404 cm-92 resistencia a la tensión y T 403 om-97 resistencia a la explosión (TAPPI, 1998).

Resultados y Discusión

En el Cuadro 1 se observa que la medición dasométrica en las tres especies de pino indica que *Pinus douglasiana* tiene el mejor desarrollo, ya que presentó la mayor altura (13.2 m), DAP (24.3 cm) y volumen (0.602 m³) con respecto a los especímenes de los otros dos taxa. *Pinus oocarpa*, aunque con más densidad (478 kg m⁻³) y DAP (18.4 cm) que *Pinus devoniana*, registró la menor altura (9.85 m).

Cuadro 1. Características dasométricas de las tres especies de pino.

Dimensión	<i>Pinus douglasiana</i>	<i>Pinus devoniana</i>	<i>Pinus oocarpa</i>
Diámetro normal (DN o DAP)	24.3 cm	15.5 cm	18.4 cm
Altura	13.2 m	12.8 m	9.85 m
Densidad	428 kg m ⁻³	435 kg m ⁻³	478 kg m ⁻³
Volumen	0.602 m ³	0.241 m ³	0.262 m ³

Respecto al balance de biomasa aprovechable como madera, *Pinus douglasiana* tuvo el porcentaje más alto (45 %) (Figura 11), mientras que *Pinus devoniana* y *Pinus oocarpa* presentaron valores más bajos (38 % y 31 % respectivamente).

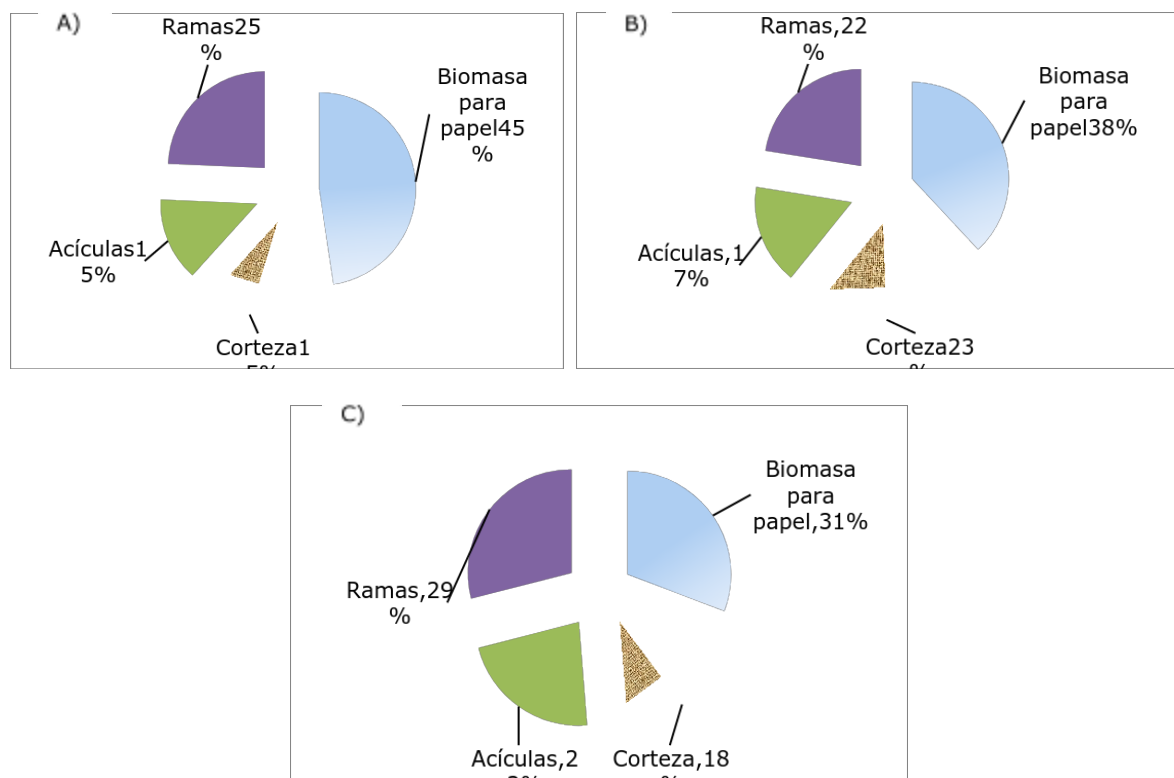


Figura 11. Balance de biomasa para A) *Pinus douglasiana* Martínez, B) *Pinus devoniana* Lindl. y C) *Pinus oocarpa* Schiede ex Schtdl.

Sobre el contenido de corteza (Figura 11), sobresalió *Pinus devoniana* (23 %), *Pinus oocarpa* registró un valor intermedio (18 %) y *Pinus douglasiana* fue el de menor contenido (15 %). En el caso de las acículas (Figura 11), para *Pinus oocarpa* se estimó el porcentaje más alto (22 %). Finalmente, y de acuerdo a la Figura 12, la mayor proporción de ramas correspondió a *Pinus oocarpa*, con 29 %.

Con base en el balance de biomasa, se sugiere que *Pinus douglasiana* se utilice como madera en diversos productos y derivados; *Pinus devoniana* fue el mejor para aplicaciones de la corteza (fenoles y taninos); y *Pinus oocarpa* para el uso de acículas (clorofila y esencias) y resinas (ácidos grasos y resínicos).

En este sentido, el aprovechamiento del bosque, normalmente, genera altos volúmenes de desperdicios fibrosos de distinta naturaleza, en el caso de la industria

de celulosa para papel, el desecho principal es la corteza, que se elimina del tronco antes de ser astillado, la cual casi siempre se quema. Baeza (1989) menciona que los principales componentes de la corteza de pino son polifenoles, ácidos fenólicos, lignina y carbohidratos. Los polifenoles de menor peso molecular pueden ser taninos solubles en agua y flobafenos solubles en etanol; por otro lado, cuando se extraen con NaOH su rendimiento es de alrededor de 50 % de la corteza. Murphey *et al.* (1970) sugiere que para el aprovechamiento de la corteza es necesario determinar sus diferencias estructurales como el tipo, la densidad y la cantidad de extraíbles presentes, ya que estas determinarán la aptitud de una especie, en particular, para obtener un producto específico.

Respecto a la composición química de las diferentes fracciones de biomasa aprovechable para papel (madera) de las tres especies de pino, se observa (Cuadro 2 y Figura 12) que el porcentaje de holocelulosa fue superior en *Pinus devoniana*, con 74.7 % y en *Pinus douglasiana*, con 74.1 %.). Bernabé-Santiago *et al.* (2013) registran contenidos de holocelulosa en *Pinus oocarpa* (74.15 %), *P. teocote* Schiede ex Schltdl. et Cham. (71.54 %), *P. michoacana* (72.96 %), *P. leiophylla* Schiede ex Schltdl. et Cham. (69.16 %) y *P. montezumae* Lamb. (68.14 %), valores muy parecidos a los documentados en el presente trabajo, y dentro del intervalo (68 – 78 %) citado por Fengel y Wegener (1989) para diferentes pinos. Sin embargo, Boonstra (2006) consigna contenidos de 79 a 81 % para *P. radiata* D. Don y *P. sylvestris* L., superiores a los obtenidos en este estudio; dichos autores señalan que utilizaron el método Rowell, el cual difiere del método Wise, utilizado en la investigación que aquí se documenta.

Cuadro 2. Composición química promedio.

Compuesto químico	<i>Pinus douglasiana</i>	<i>Pinus devoniana</i>	<i>Pinus oocarpa</i>
------------------------------	---------------------------------	-------------------------------	-----------------------------

Fracción de carbohidratos en %			
Holocelulosa Wise	74.1	74.7	72.2
Alfa celulosa <i>Coss y Bevan</i>	47.6	47.8	42.1
Pentosanos	9.0	11.9	11.8

Fracción de extraíbles y lignina			
Extraíbles en agua caliente	1.8	2.6	2.35
Extraíbles en alcohol / tolueno	3.7	2.3	4.2
Lignina <i>Klason</i>	30.4	31.3	32.1

Fracción mineral			
Cenizas	0.53	0.27	0.38



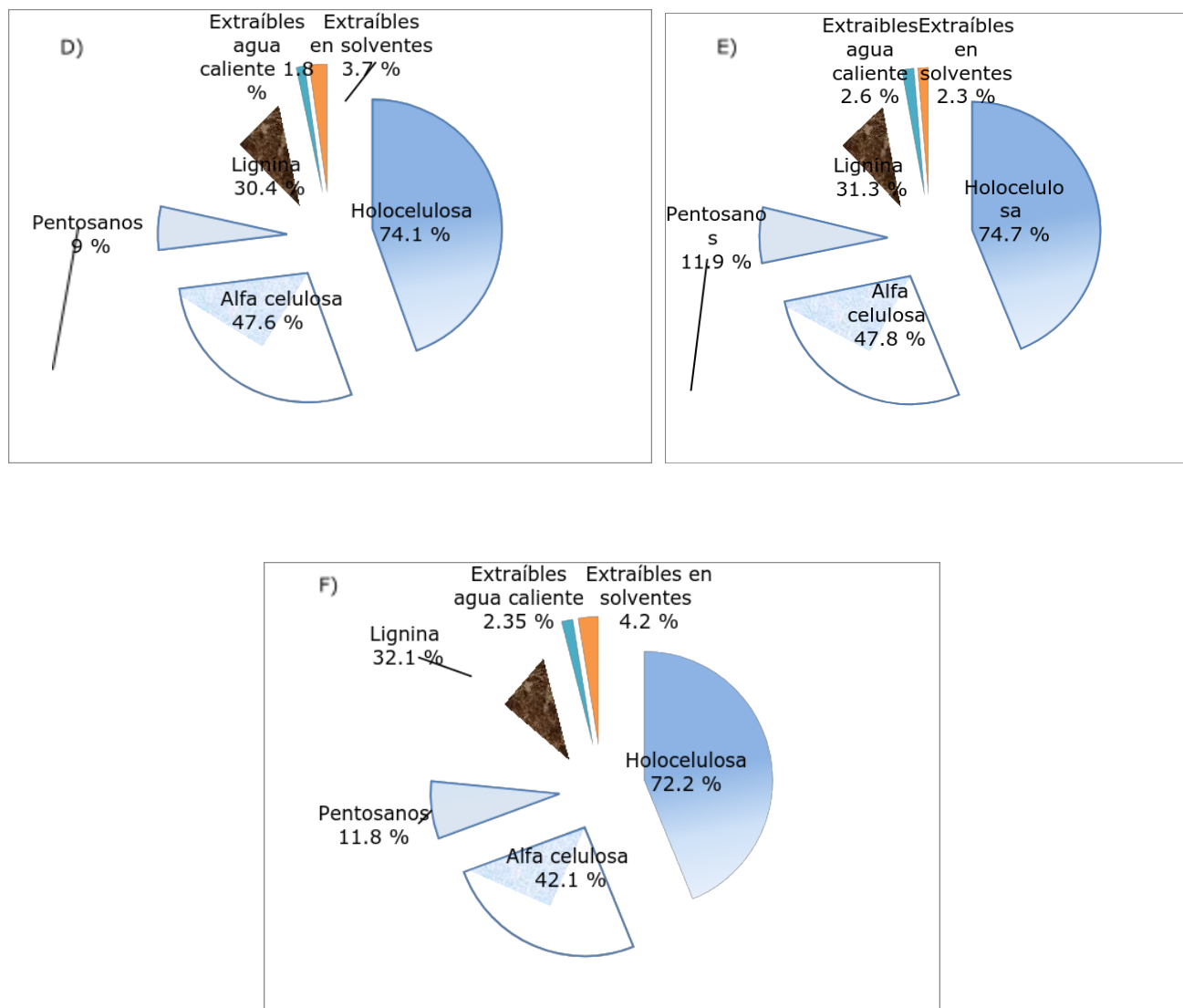


Figura 12. Principales fracciones químicas para D) *Pinus douglasiana* Martínez, E) *Pinus devoniana* Lindl. y F) *Pinus oocarpa* Schiede ex Schldl.

Por otro lado, la fracción alfa-celulosa (Cuadro 2, Figura 12) registró el contenido más alto en *Pinus devoniana*, con 47.8 % y *Pinus douglasiana*, con 47.6 %; el menor valor correspondió a *Pinus oocarpa*, con (42.1 %). Resultados que están en el intervalo de 41.22 a 50.79 % citado en la literatura (Saka, 2001; Sjöstrom, 1999; Fengel, 1989).

El contenido de pentosanos para la madera de las tres especies de pino (Cuadro 2 y Figura 12) muestran valores entre 9 y 11.9 %, los cuales corresponden con lo registrado por Sjöstrom (1999) y Fengel y Wegener (1989) (8 a 13 %) para pinos. El valor inferior se obtuvo para *P. douglasiana*, con 9.0 % y los más altos para *P. devoniana*, con 11.9 %) y *P. oocarpa*, con 11.8 %.

La fracción de carbohidratos, denominada holocelulosa, (compuesta por alfa celulosa y pentosanos) indica el nivel de calidad de una fuente fibrosa para sugerirla como materia prima en la industria de la celulosa y papel; en este caso, *P. devoniana* presentó la cifra más alta en holocelulosa (74.7 %), alfa celulosa (47.8 %) y pentosanos (11.9 %), por lo que representa la mejor opción para la obtención de pulpa celulósica y la fabricación de papel y cartón.

El contenido de lignina (Cuadro 2 y Figura 12) fue de 32.1 % para la madera de *P. oocarpa*, 31.3 % para *P. devoniana* y 30.4 % para *P. douglasiana*; valores relativamente superiores al intervalo de 19 a 30 % indicado cuando se aplica el método TAPPI T-222 (TAPPI, 1998). En general, el contenido de lignina en *P. oocarpa* (32.1 %), constituye la mejor opción de aplicación de acuerdo con Chávez-Sifontes y Domine (2013) para lignosulfonatos, polímero o copolímero de algunas resinas o adhesivos.

Referente al contenido total de extraíbles en agua caliente y alcohol tolueno (Cuadro 2, Figura 12), la madera de *P. oocarpa*, con 6.55 % tuvo el mayor contenido de extraíbles totales; sin embargo, los contenidos en *P. douglasiana*, con 5.5 % y *P. devoniana*, con 4.9 % tampoco son bajos. Es importante mencionar que la norma TAPPI T-204 cm-97, señala valores de 1.5 a 11 %; por lo tanto, los resultados obtenidos en el presente estudio se ubican en dicho intervalo.

Con base en lo anterior, los extraíbles de la madera de pino pueden tener diversas aplicaciones. Sobre el particular, Goldstein (2017) documenta que el aceite de trementina y la colofonia son los más importantes a nivel industrial, por ello esta sería la sugerencia para su aprovechamiento.

Las cenizas (Cuadro 2) determinadas en la madera de *P. douglasiana* (0.58 %) fue el registro más alto, mientras que en *P. devoniana* su contenido fue el menor (0.27 %); en este sentido y comparado con los reportados por la técnica T 211 om-93 que es de 0.25 a 0.50 % (TAPPI, 1998), el cual cubre el contenido de cenizas determinado en este trabajo (0.38 %). En relación al contenido de cenizas registrado para las tres especies estudiadas, es importante decir que, durante el proceso de cocción de la madera para obtener celulosa para papel, el contenido alto de cenizas aumenta el consumo de reactivos y la probable incrustación de las líneas de alimentación, por lo tanto, *P. devoniana* cuyo contenido de cenizas fue el menor es la más adecuada para ese uso.

En la medición de fibras, mediante el análisis micrográfico (Cuadro 3), las de *P. devoniana* fueron las más largas (3.87 mm), con respecto a las de *P. douglasiana* (2.97 mm) y *P. oocarpa* (3.10 mm). Borja *et al.* (2001) midieron la longitud de fibra en *P. caribea* Morelet registraron un valor de 4.41 mm, superior a los del presente estudio; sin embargo, esto es normal, debido a que la variación de crecimiento se establece de acuerdo con la especie, tratamiento, así como de las condiciones climatológicas y topográficas.

Cuadro 3. Longitud de fibra promedio.

Especie	Longitud en mm
<i>Pinus douglasiana</i> Martínez	2.97
<i>Pinus devoniana</i> Lindl.	3.87
<i>Pinus oocarpa</i> Schiede ex Schltl.	3.10

La preparación de muestras para medición de fibras y observación micrográfica (Figura 13), se hizo a partir de papel estándar con tratamiento de refinación (60 minutos). Los resultados indicaron que las fibras de *P. devoniana* presentan mayor fibrilación y flexibilidad (fibras dobladas), lo cual, normalmente, incrementa la superficie de contacto y la unión interfibrilar, lo que permite una mejor consolidación fibrilar y mayor resistencia fisicomecánica en el papel. Para el caso de las fibras de *P. oocarpa* y *P. douglasiana* no tuvieron el mismo efecto, además se observó que las de *P. oocarpa* presentaron la micro fibrilación y la flexibilidad más baja.

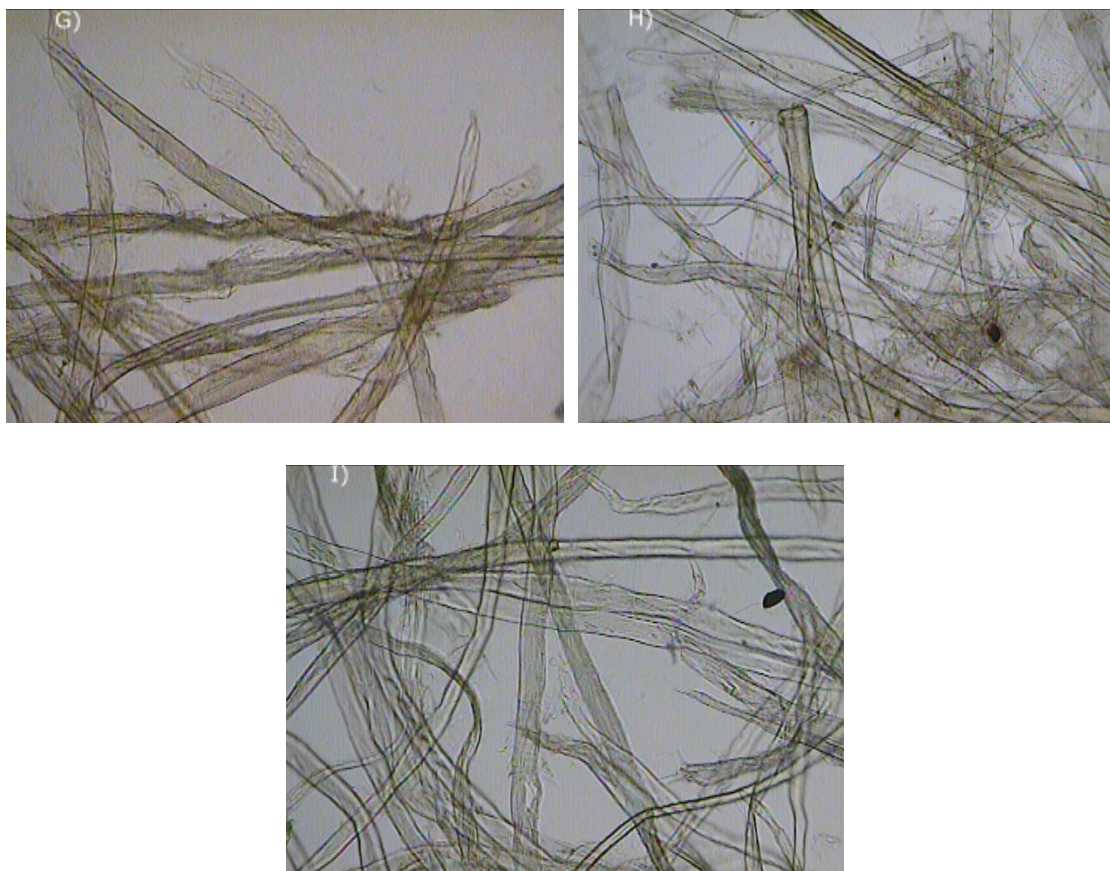


Figura 13. Micrografía de las maderas de G) *Pinus douglasiana* Martínez, H) *Pinus devoniana* Lindl. y I) *Pinus oocarpa* Schiede ex Schltdl. (50X).

La evaluación de la resistencia fisicomecánica determinada en hojas de papel estándar, a partir de celulosa de cada una de las tres especies de pino (Cuadro 4, Figura 14), para *P. devoniana* presentó los mejores índices de resistencia fisicomecánica en tensión (83.1 N.m g^{-1}) y explosión ($7.6 \text{ kPa.m}^2 \text{ g}^{-1}$). El papel de *P. douglasiana* tuvo su mejor propiedad de resistencia fisicomecánica en el índice de rasgado ($10.8 \text{ N.m}^2 \text{ kg}^{-1}$) y el de *P. oocarpa* registró las propiedades de resistencia más bajas en índice de tensión y explosión, aunque el índice de rasgado ($9.9 \text{ N.m}^2 \text{ kg}^{-1}$) fue superior al de *P. devoniana* ($8.6 \text{ N.m}^2 \text{ kg}^{-1}$).

Cuadro 4. Índices de resistencia fisicomecánica promedio.

Especie	Índice tensión N.m g⁻¹	Índice explosión kPa.m² g⁻¹	Índice rasgado N.m² g⁻¹
<i>Pinus douglasiana</i> Martínez	68.2	6.4	10.8
<i>Pinus devoniana</i> Lindl.	83.1	7.6	8.6
<i>Pinus oocarpa</i> Schiede ex Schltdl.	59.7	5.5	9.9
Promedio	70.3	6.5	9.7

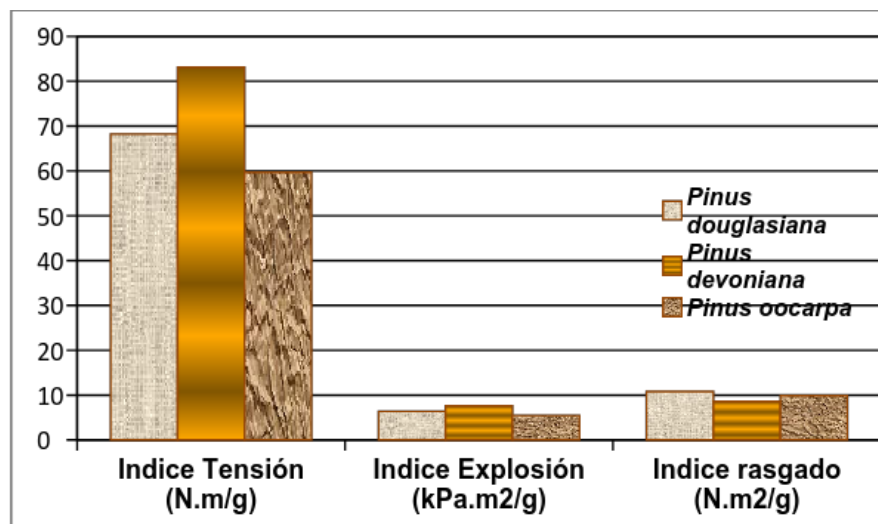


Figura 14. Propiedades fisicomecánicas determinadas en hojas de papel estándar.

Zanuttini *et al.* (2008) registran índices de resistencia fisicomecánica mínima para papel *Kraft* para sacos: índice de tensión 55 N.m g⁻¹, índice de explosión 5.2 kPa.m² g⁻¹ e índice de rasgado 13.1 mN.m² g⁻¹. Si se comparan con los obtenidos en este estudio, que en promedio fueron para índice de tensión 70.33 N.m g⁻¹ e índice de explosión 6.5 kPa.m² g⁻¹, se se observa que están por encima, sin embargo el índice de rasgado promedio (9.7) es inferior al citado por Zanuttini (2008).

Conclusiones

La medición dasométrica indica que *Pinus douglasiana* presenta la mayor altura (13.2 m), DAP (24.3 cm) y volumen (0.602 m³), que lo ubica como una especie viable para ser utilizada como madera aserrada y para la obtención de celulosa para papel.

El balance de biomasa aprovechable como madera, señala que *Pinus douglasiana* tiene el porcentaje más alto de aprovechamiento (45 %), aunque el *Pinus devoniana* también cuenta con un buen nivel de aprovechamiento (38 %), lo que

confirma que estas dos especies son viables para utilizarse como madera aserrada y en la obtención de celulosa para papel. Además, el contenido de corteza en *P. devoniana* es superior (23 %); por lo tanto, es aplicable para la obtención de taninos y fenoles. Respecto al aprovechamiento de acículas (clorofila y esencias) y resinas (brea, colofonia y aceite de trementina), *P. oocarpa* es el indicado, ya que tiene el mayor contenido en acículas y ramas 22 % y 29 %, respectivamente.

Sobre la composición química de la biomasa (madera) aprovechable para papel (madera), *P. devoniana* presenta el contenido más alto en holocelulosa (74.7 %), alfa celulosa (47.8 %) y pentosanos (11.9 %). El contenido de lignina (32.1 %) y el contenido total de extraíbles en agua caliente y alcohol tolueno (6.55 %) es superior en *P. oocarpa*, mientras que el contenido de cenizas es menor (0.27 %) en *P. devoniana*.

El análisis micrográfico y la determinación de propiedades fisicomecánicas en papel estándar, registran que las fibras de *Pinus devoniana* son las más largas (3.87 mm) y también le corresponden los mejores índices de resistencia fisicomecánica en tensión (83.1 N.m g⁻¹) y explosión (7.6 kPa. m² g⁻¹).

Se concluye que la madera de *Pinus devoniana* es la que presenta mejor viabilidad de aprovechamiento para la obtención de celulosa y fabricación del papel, por tener mejores indicadores dasométricos, más cantidad de carbohidratos y mayor longitud de fibra (mejores propiedades fisicomecánicas en el papel), también presenta el menor contenido de lignina y cenizas (menos consumo de reactivos en el proceso de cocción para la obtención de pulpa). En contraste, la madera de *Pinus douglasiana* se recomienda, primero, para su aplicación como madera de aserrío y en segunda instancia, para la fabricación de papel; y la madera de *Pinus oocarpa* se sugiere aprovecharla en colofonia y aceite de pino (mayor cantidad de extraíbles totales), fibras de carbón y adhesivos (más cantidad de lignina), la celulosa podría ser utilizada en la obtención de *Whiskers* de celulosa o bioetanol.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Secretaría de Educación Pública, que mediante el Programa para el Fortalecimiento de los Cuerpos Académicos PROMEP (2012 – 2014), brindó el apoyo para el proyecto “Diagnóstico y manejo de plantaciones forestales de pino en fase latizal: Protección y estudios preliminares para un aprovechamiento integral” (Cuerpo Académico CA-193).



Conflicto de interés

Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés.

Contribución por autor

Teófilo Escoto García: concepción y planeación del trabajo, gestión y organización de los materiales y reactivos químicos para el desarrollo experimental, revisión de resultados y redacción del manuscrito; Nelson Beas Beas: desarrolló la parte experimental y redacción del trabajo; Héctor Jesús Contreras Quiñones: asesor en la parte de manejo forestal (dasometría) y corte de los especímenes utilizados en el estudio; Antonio Rodríguez Rivas: asesoría en manejo forestal (dasometría) y tala de las especies; Sara Gabriela Díaz Ramos: asesora en la parte de balance de biomasa y caracterización botánica de las especies utilizadas; José Anzaldo Hernández: asesor de la parte micrográfica y de obtención de pulpa para fabricar

papel a partir de la madera; Raúl Vega Elvira: asesor de la parte de composición química básica de las tres especies de pino.

Referencias

- Aguilera, R. M. 2001. Descripción de las características del *Pinus devoniana*. www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/13/957Pinus%20devoniana.pdf (10 de diciembre 2013).
- Álvarez-Castillo, A., E. García-Hernández, M. M. Domínguez- Domínguez, J. M. Granados-Baeza, A. Aguirre-Cruz, R. Carmona-García, A. Morales-Cepeda, P. J. Hernández-Franco, A. Licea-Claverie y A. A. Mendoza-Martínez. 2012. Aprovechamiento integral de los materiales lignocelulósicos. *Revista Iberoamericana de Polímeros* 3 (4): 140-150.
- Ávila, L. E. y M. A. Herrera. 2012. Efecto de los extraíbles en tres propiedades físicas de la madera de *Enterolobium cyclocarpum* procedente de Michoacán México. *Bosque (Valdivia)* 33(2):227-232.
- Baeza, J. H. 1989. Química y utilización de la corteza y sus extractivos. Seminario Sobre Uso de Adhesivos a Base de Taninos. Concepción, Chile. pp. 227-228.
- Bernabé-Santiago, R., L. E. A. Ávila-Calderón y J. G. Rutiaga-Quiñones. 2013. Componentes químicos de la madera de cinco especies de pino del municipio de Morelia, Michoacán. *Madera y Bosques* 19(2): 21-35.
- Boonstra, M. J. and B. Tjeerdsma. 2006. Chemical analysis of heat treated softwoods. *Holz als Roh- und Werkstoff* 64 (3): 204 - 211.
- Borja D., A., D. J. Meza J. y A. Romero L. 2001. Cinco características tecnológicas de la madera de *Pinus caribaea* var. *ondurensis* Barr et Golf. *Revista Ciencia Forestal en México*. 26(90):29-53.
- Chapa G., L. A. 2011. Química. Clasificación de carbohidratos. <http://cb10laura.blogspot.mx/2011/05/clasificacion-de-carbohidratos.html> (16 de marzo de 2017).

Chávez-Sifontes, M. y M. E. Domine. 2013. Lignina estructura y aplicaciones: métodos de despolimerización para la obtención de derivados aromáticos de interés industrial. *Revista Avances en Ciencias e Ingeniería* 4(4): 15-46.

Ciencia y Biología. 2017. Generalidades de gimnospermas.

<https://cienciaybiologia.com/generalidades-de-gimnospermas/> (16 de abril de 2017).

Cotler, A. H. 2007. Características y manejo de suelos en ecosistemas templados de montaña. <http://www.publicaciones.inecc.gob.mx/libros/395/cotler.htm> (13 de abril de 2017).

Eguiluz, P. T. 1998. Distribución natural de los pinos en México. Colegio de posgraduados de Chapingo. Texcoco, Edo. de Méx., México. pp. 25-30.

Erick, H. P. 2016. World of sedes. Maravilloso mundo de los terpenos.

http://www.worldofseeds.eu/wos_es/blog/El_Maravilloso_Mundo_de_los_Terpenos/ (16 de marzo de 2017).

Escoto G., T., A. Rodríguez R., H. J. Contreras Q., S. G. Díaz R. y H. G. Ochoa R. 2013 Aprovechamiento integral de recursos forestales no maderables, Investigación y sustentabilidad. CUCEI Universidad de Guadalajara. Editorial Talleres Ediciones de la Noche. Guadalajara, Jal., México. pp. 16-17.

Fengel, D. and Wegener G. 1989. Wood: chemistry, ultrastructure, reactions. Walter De Gruyter Inc. New York, NY USA. pp. 6-59.

García G., J. L. 2015. Sistema Esquelético de las Plantas Ciencias de Joseleg. <http://cienciasdejoseleg.blogspot.mx/2015/01/sistema-esqueletico-en-las-plantas.html> (16 de febrero de 2017).

Gellerstedt, G. 2009. The Worldwide Wood Resource. *In: Ek, M., G. Gellerstedt and G. Henriksson (eds.). Pulp and Paper Chemistry and Technology, Wood Chemistry and Wood Biotechnology Vol. 1.* Walter de Gruyter GmbH & Co. Berlín, Germany. pp. 1-12.

Goldstein, I. S. 2017 Productos químicos derivados de la madera. <http://www.fao.org/docrep/n5525s/n5525s=1.htm> (30 de enero 2017).

González, A. M. 2013a. Morfología de plantas vasculares. Estructura secundaria del tallo. <http://www.biologia.edu.ar/botanica/tema18/tema18-1estr2.htm> (16 de marzo de 2017).

González, A. M. 2013b. Morfología de plantas vasculares. <http://www.biologia.edu.ar/botanica/tema15/15-4traqueidas.htm> (16 de marzo de 2017).

Gutiérrez V., B. N., M. Gómez C., M. H. Gutiérrez V. y C. Mallen R. 2013. Variación fenotípica de poblaciones naturales de *Pinus oocarpa* Schiede ex Schltdl. en Chiapas. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 4(19): 47-49.

Huerta C., M., A. Rodríguez R. y E. Hernández A. 1985. Experiencias de investigación en el campo experimental Bosque Escuela en la sierra La Primavera, Jalisco. I Foro de investigación y conservación del Bosque La primavera 23-22 septiembre 2005. Zapopan Jal., México. pp. 22-23.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (Inegi). 2013. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, Formaciones vegetales en México. <http://www.inegi.gob.mx> (16 de julio 2013).

Hevia J., Y., J. E. Tacoronte M., J. Sánchez N., A. A. Vázquez P., A. Gutiérrez, O. Tiomnova y A. Díaz. (2008). Scielo. Estudios de laboratorio sobre la acción molusquicida de la resina de pino, colofonia, sobre *Biomphalaria havanensis*. *Revista Cubana de Medicina Tropical* 60(2):187-189.

Martínez, M. 1992. Los Pinos Mexicanos. Editorial Ediciones Botas. México, D.F., México 361 p.

Martínez, M. 2013. Descripción de las características del *Pinus douglasiana*. <http://beta.semarnap.gob.mx/pfnm/> (6 de diciembre de 2013).

Murphey, W. K., F. C. Beall, B. E. Cutter y R. C. Baldwin. 1970. Selected Chemical and Physical Properties of Several Bark Species. *Forest Products Journal* 20 (2): 58-59.

Olvera C., P. 1981. Estudio anatómico de la madera de siete especies del género *Pinus*. Boletín Técnico, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales. Boletín Técnico Núm. 71. México, D.F., México. 52 p.

Olvera C., P. 1985. Descripción anatómica de la madera de siete especies del género *Pinus*. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales. Boletín Técnico Núm. 126. México, D.F., México. 73p.

Perry, J. P. 1991. The Pines of México and Central America. Edited by Timber Press. Portland, OR USA. pp. 45-70.

Rodríguez S., S. y M. Torres U. 1994. Análisis cuantitativo de componentes principales y secundarios en la corteza de diversas especies nativas y exóticas de la provincia de Llanquihue, X Región, Chile. *Revista Bosque* 15(2): 45-48.

Rodríguez B., W. 2014. Tecnología e Informática. Materiales de uso Técnico Madera. <http://www.biologia.edu.ar/botanica/tema18/tema18-1estr2.htm> (16 de abril de 2017).

Rowell, R. M. 2005. Handbook of wood chemistry and wood composites. Edited by Taylor and Francis CRC Press. New York, NY USA. 504 p.

Saka, S. 2001. Chemical composition and distribution. *In: Hon, D. N. S. and N. Shiraishi (es.). Wood and Cellulose Chemistry. 2nd Edition. Marcel Dekker Inc. New York, NY, USA. pp. 51 - 80.*

Sjöström, E. 1993. Wood Chemistry: Fundamentals and Applications. 2nd Edition. Academic Press Inc. San Diego, CA USA. .pp. 51 - 70.

Sjöström, E. and U. Westermarck. 1999. Chemical Composition of Wood and Pulps: Basic constituents and their distribution. *In: Sjöström, E. AND R. Alén (ed.).*

Analytical Methods in Wood Chemistry Pulping and Papermaking. Springer Series Springer in Wood Science. Heidelberg, Germany. pp. 1-22.

Technical Association of the Pulp and Paper Industry (TAPPI). 1998. Technical Association of Pulp and Paper Industry. Test methods 1998 – 1999. TAPPI Press 30348-513 Atlanta, GA USA. 850 p.

Timell, T. E. 1967. Recent Progress in the Chemistry of Wood Hemicelluloses. Wood Sciences and Technology 1(1): 45-70.

Wordpress. 2017. Silvicultura elección libre - Semillas.

<https://silviculturauvmeif.wordpress.com/semillas-forestales/>. (16 de marzo de 2017).

Universidad Nacional del Nordeste. 2000. Crecimiento secundario: Madera. <http://www.efn.unc.edu.ar/departamentos/biologia/intrbiol/maderas.htm> (16 de enero de 2017).

Zanuttini, M., C. Antúnez, A. Clemente, A. L. Torres, P. Ferreira y P. Mochiutti. 2008. Capítulo VI Propiedades del papel. *In*: Area, M. C. (ed). Panorama de la industria de celulosa y papel en Iberoamérica. <http://www.riadicy.org/libros/pdfs/panorama/cpitulo6.pc> (15 de marzo de 2017).

