



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS
DE HIDALGO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN TECNOLOGÍA DE LA
MADERA**

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO

MAESTRÍA EN CIENCIAS Y TECNOLOGÍA DE LA MADERA

TESIS

“ Composición química de la madera de tres especies de eucalipto”

Que para obtener el grado de:
MAESTRO EN CIENCIAS Y TECNOLOGÍA DE LA MADERA

PRESENTA:
Ing. Irak Coello Ruiz

DIRECTOR:
Dr. José Guadalupe Rutiaga Quiñones

ASESORES:
Dra. Lada Domratcheva Lvova
M. en C. Héctor Guillermo Ochoa Ruiz

Morelia, Mich., Agosto 2006



Este trabajo de investigación (“Composición química de la madera de tres especies de Eucalipto”) se llevó a cabo en los Laboratorios de Investigación de la División de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera dependiente de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo y en los Laboratorios del Departamento de Madera, Celulosa y Papel “*Ing. Karl Augustin Grellmann*” de la Universidad de Guadalajara.

Y se realizó dentro del proyecto con clave 12450 (2004-2006) aprobado por los Fondos Mixtos CONACYT – Gobierno del Estado de Michoacán al Dr. José Guadalupe Rutiaga Quiñones, donde la Dra. Lada Domratcheva Lvova (F.I.TEC.MA.- UMSNH) y el M. en C. Héctor Guillermo Ochoa Ruiz (DMCYP - U de G) fungen como colaboradores.

Índice

	Página	
1	Introducción	1
2	Generalidades de las Especies	2
2.1	<i>Eucalyptus citriodora</i> Hook	2
2.2	<i>Eucalyptus robusta</i> Smith	5
2.3	<i>Eucalyptus saligna</i> Smith	7
3	Antecedentes	9
4	Objetivos	13
5	Justificación	13
6	Metodología	14
6.1	Recolección y preparación del material de estudio	14
6.2	Propiedades químicas de las especies	15
6.2.1	Determinación del pH	18
6.2.2	Determinación del contenido de cenizas	18
6.2.3	Obtención de extraíbles	19
6.2.4	Determinación de lignina	20
6.2.5	Determinación de holocelulosa	21
6.2.6	Cuantificación e identificación de azúcares por HPLC	22
6.2.7	Determinación del poder calorífico	23
7	Resultados	25
7.1	pH	27
7.2	Inorgánicos	30
7.3	Extraíbles	33
7.4	Lignina	38
7.5	Holocelulosa	41
7.6	Cuantificación de azúcares	44
7.7	Poder calorífico	46
8	Discusión de Resultados	47
9	Conclusiones	58
10	Recomendaciones	60
11	Bibliografía	61
12	Apéndices	67

Índice de Tablas

	Página
Tabla 1. Datos de recolección y muestreo de los Eucaliptos.	14
Tabla 2. Valores obtenidos de la composición química de la albura.	25
Tabla 3. Valores obtenidos de la composición química del duramen.	26
Tabla 4. Análisis de varianza (Anova) para el pH.	27
Tabla 5. Prueba del rango múltiple para el pH por especie.	29
Tabla 6. Prueba del rango múltiple para el pH por altura.	29
Tabla 7. Prueba del rango múltiple para el pH por zona.	29
Tabla 8. Análisis de varianza (Anova) para el contenido de cenizas.	30
Tabla 9. Prueba del rango múltiple para cenizas por especie.	32
Tabla 10. Prueba del rango múltiple para cenizas por altura.	32
Tabla 11. Prueba del rango múltiple para cenizas por zona.	32
Tabla 12. Valores de las extracciones con los diferentes solventes para la albura en %.	33
Tabla 13. Valores de las extracciones con los diferentes solventes para el duramen en %.	34
Tabla 14. Análisis de varianza (Anova) para el contenido de extraíbles.	35
Tabla 15. Prueba del rango múltiple para extraíbles por especie.	37
Tabla 16. Prueba del rango múltiple para extraíbles por altura.	37
Tabla 17. Prueba del rango múltiple para extraíbles por zona.	37
Tabla 18. Análisis de varianza (Anova) para el contenido de lignina.	38
Tabla 19. Prueba del rango múltiple para lignina por especie.	40
Tabla 20. Prueba del rango múltiple para lignina por altura.	40
Tabla 21. Prueba del rango múltiple para lignina por zona.	40
Tabla 22. Análisis de varianza (Anova) para el contenido de holocelulosa.	41
Tabla 23. Prueba del rango múltiple para holocelulosa por especie.	43
Tabla 24. Prueba del rango múltiple para holocelulosa por altura.	43
Tabla 25. Prueba del rango múltiple para holocelulosa por zona.	43
Tabla 26. Porcentaje de los azúcares en la albura por especie, a dos alturas.	44
Tabla 27. Porcentaje de los azúcares en el duramen por especie, a dos alturas.	45
Tabla 28. Resultados de poder calorífico para albura y duramen.	46

Índice de Figuras

		Página
Figura 1.	Árbol de <i>Eucalyptus citriodora</i> Hook.	2
Figura 2.	Árbol de <i>Eucalyptus robusta</i> Smith.	5
Figura 3.	Árbol de <i>Eucalyptus saligna</i> Smith.	7
Figura 4.	Imágenes en plano transversal de la madera de los tres Eucaliptos.	14
Figura 5.	Molino Retsch.	15
Figura 6.	Criba Vibratoria Rotap.	15
Figura 7.	Secuencia seguida para la determinación del % de humedad.	15
Figura 8.	Diagrama general para el análisis químico de los <i>Eucalyptus</i> .	16
Figura 9.	Potenciómetro para medir el pH.	18
Figura 10.	Secuencia seguida para la obtención de cenizas.	19
Figura 11.	Secuencia seguida para la extracción con Soxhlet.	20
Figura 12.	Secuencia seguida para la extracción con agua caliente.	20
Figura 13.	Secuencia seguida para la obtención de lignina.	21
Figura 14.	Secuencia seguida para la obtención de holocelulosa.	21
Figura 15.	Secuencia seguida para la cuantificación e identificación de azúcares.	23
Figura 16.	Detalles para preparar la bomba calorimétrica utilizada.	24
Figura 17.	Representación gráfica de las propiedades químicas de la albura.	25
Figura 18.	Representación gráfica de las propiedades químicas del duramen.	26
Figura 19.	Efecto de la especie sobre el pH.	28
Figura 20.	Efecto de la altura sobre el pH.	28
Figura 21.	Efecto de la zona sobre el pH.	28
Figura 22.	Efecto de la especie sobre el contenido de cenizas.	31
Figura 23.	Efecto de la altura sobre el contenido de cenizas.	31
Figura 24.	Efecto de la zona sobre el contenido de cenizas.	31
Figura 25.	Gráfica de los valores obtenidos en las extracciones para la albura.	33
Figura 26.	Gráfica de los valores obtenidos en las extracciones para el duramen.	34
Figura 27.	Efecto de la especie sobre el contenido de extraíbles.	36
Figura 28.	Efecto de la altura sobre el contenido de extraíbles.	36
Figura 29.	Efecto de la zona sobre el contenido de extraíbles.	36
Figura 30.	Efecto de la especie sobre el contenido de lignina.	39
Figura 31.	Efecto de la altura sobre el contenido de lignina.	39
Figura 32.	Efecto de la zona sobre el contenido de lignina.	39
Figura 33.	Efecto de la especie sobre el contenido de holocelulosa.	42
Figura 34.	Efecto de la altura sobre el contenido de holocelulosa.	42
Figura 35.	Efecto de la zona sobre el contenido de holocelulosa.	42
Figura 36.	Gráfica del % de azúcares en la albura por especie, a dos alturas.	44

Figura 37.	Gráfica del % de azúcares en el duramen por especie, a dos alturas.	45
Figura 38.	Ejemplo de un perfil cromatográfico para la identificación y cuantificación de azúcares.	46

Apéndices

	Página
Apéndice A. Valores promedio de la composición química de la albura.	67
Apéndice B. Valores promedio de la composición química del duramen.	67
Apéndice C. Valores promedio del % de azúcares en la albura.	67
Apéndice D. Valores promedio del % de azúcares en el duramen.	67

Composición química de la madera de tres especies de eucalipto

RESUMEN

Para la realización de éste trabajo fue colectado un árbol de tres especies de eucalipto (*Eucalyptus citriodora*, *E. robusta* y *E. saligna*) de siete años de edad, procedentes de la plantación experimental de Crisoba Industrial S. A. de C. V., planta Morelia. Se tomaron muestras de cada árbol a dos alturas, las cuáles se separaron en zonas (albura y duramen) para realizar el análisis químico, determinando las propiedades químicas: pH, contenido de cenizas, solubilidad de sustancias extraíbles (en solventes de polaridad ascendente y agua caliente), cuantificación de lignina, y de holocelulosa. Se realizó también la identificación y cuantificación de azúcares presentes en la madera. Una vez terminado el análisis químico se llevó a cabo la determinación de poder calorífico en harina sin extraer y harina libre de extractos de albura y duramen.

Procesados y analizados estadísticamente los resultados indicaron que: para pH existe diferencia estadística entre especies siendo más ácido *E. robusta*, la parte baja es más ácida que la alta y el duramen es más ácido que la albura; el contenido de cenizas fue mayor en *E. citriodora* respecto a las otras dos especies, sin diferencia estadística entre alturas, y existiendo en albura mayor cantidad de cenizas que en duramen; en cuanto a la cantidad de extraíbles *E. robusta* fue la especie con el mayor porcentaje y *E. saligna* con menor, teniendo entre las especies diferencia estadística, también se encontró en la parte baja del árbol más cantidad de los mismos que en la parte alta, y a su vez en el duramen; la especie con mayor cantidad de lignina fue *E. saligna*, y *E. citriodora* fue la que tuvo la menor cantidad, se encontró mayor proporción en la parte baja que en la alta y en la albura más que en el duramen; el porcentaje de holocelulosa igualmente resultó ser mayor en *E. citriodora* y la especie con menor cantidad de holocelulosa fue *E. robusta*, la parte baja presenta más holocelulosa que la parte alta y no hay diferencia estadística en albura y duramen.

Se identificaron en las tres especies Glucosa, Xilosa, Arabinosa, Galactosa y Manosa, siendo Glucosa y Xilosa los azúcares que más proporción presentan referidos a Arabinosa y Galactosa en particular, puesto que la Manosa resultó muy baja en porcentaje; *E. saligna* fue el que más porcentaje de azúcares presentó de las tres especies. El análisis de calorimetría llevado a cabo en albura y duramen mostró los mejores resultados en la harina sin extraer y los valores más altos se registraron en la albura de los eucaliptos.

Chemical composition from three Eucalypt species wood

SUMMARY

To achieve this work, was necessary to pick a seven years old tree from three eucalypt species (*Eucalyptus citriodora*, *E. robusta* and *E. saligna*) coming from an experimental plantation of Crisoba Industrial S. A. de C. V., planta Morelia. Two heights samplers of each tree was taken, which ones were separated in zones (sapwood and heartwood) to make chemical analysis determinating chemical properties: pH, ash content, extraible substances solubility (in ascendant polarity solvents and hot water), lignin and holocelullose quantification. Identification and quantification from sugars presents in wood was realized too. Once the chemical analysis finalized, calorific power determination was realized on woodmeal without extract and free extract woodmeal from sapwood and heartwood.

The processed and statistically analyzed results indicate that: for pH exists a statistic difference between species, being *E. robusta* more acid. Down part is more acid than high part, and heartwood is more acid than sapwood; the ashes content was bigger in *E. citriodora* regarding the other two species, without statistic difference between heights, and existing on sapwood a bigger presence of ashes content than heartwood; as for the extractives quantity, *E. robusta* was the specie with higher percent and *E. saligna* the one with lowest percent, registering statistic difference between species, founding in the down part of the tree a higher quantity of them than in higher part and at the same time on heartwood; the specie with the bigger quantity of lignina was *E. saligna* differing of *E. citriodora* who present the lowest quantity, the bigger proportion was found in down part nor the higher and on sapwood nor heartwood; holocelullose percent equally results being bigger in *E. citriodora* and the specie with the lowest percent of holocelullose was *E. robusta*, down part presents more holocelullose presence than higher part and there is not statistic difference in sapwood and heartwood.

On the three species was identified Glucose, Xilose, Arabinnose, Galactose and Mannose, being both, Glucose and Xilose, the sugars who present a higher proportion referring to Arabinnose and Galactose in particular, therefore the Mannose percent resulting was very low; *E. saligna* was the specie, out of the three, who presented the higher percent of sugars. The calorimetric analysis carried out on sapwood and heartwood showed the best results in the woodmeal without extract, where the higher values happened on the eucalypts sapwood.

1. INTRODUCCIÓN

Originarias de Australia y Tasmania, las especies del género *Eucalyptus*, son árboles de crecimiento rápido, que han despertado interés en muchos campos de la industria manufacturera, gracias al enorme número de posibilidades que ofrece con su gran cantidad de especies y su facilidad de adaptación en condiciones ecológicas muy variadas (Macías 1993, Montoya 1995).

En Michoacán, diferentes especies de Eucalipto han encontrado una buena adaptación y se han introducido con propósitos de recuperación y protección de suelos (Macías 1993), o bien, para formar áreas de esparcimiento para la población (Martínez 1988).

Los árboles de este género constituyen una fuente de material lignocelulósico, que puede estar disponible en tiempo relativamente corto, pues son especies de rápido crecimiento, como se ha comprobado en la propia plantación experimental de Crisoba Industrial en Morelia, con ejemplares de 7 u 8 años de edad, que pudieran ser ya utilizados como material celulósico.

Sumado a esto, se sabe que en los procesos de transformación, como el de la industria papelera, se generan grandes cantidades de desperdicio. Lo mismo pasa al momento de extraer la madera en los bosques.

Sería atractivo poder canalizar estos desperdicios, como materia prima, a algún tipo de uso o de transformación como pudiera ser la extracción de sustancias útiles para diversas aplicaciones o la producción y generación de energía a través de la madera. Esto contribuiría favorablemente al aspecto económico, ambiental y social.

La presente investigación tiene como objetivo analizar químicamente la madera (albura y duramen) de las especies de *Eucalyptus citriodora*, *E. robusta* y *E. saligna*, para así tener un conocimiento científico que pueda dar pauta a usos específicos de estas especies, sobre todo en lo relativo a la producción de pulpa para papel, y la valoración de su potencial para generar energía. Ésta se realizó dentro de un proyecto de investigación aprobado por los Fondos Mixtos del CONACYT – Gobierno del Estado de Michoacán (Clave 12450).

2. GENERALIDADES DE LAS ESPECIES

2.1 *Eucalyptus citriodora* Hook.

En la figura 1 se presenta un ejemplar de *Eucalyptus citriodora* Hook.



Figura 1. Árbol de *Eucalyptus citriodora* Hook.

TAXONOMIA.

Reino: PLANTAE
División: MAGNOLIOPHYTA
Clase: MAGNOLIOSIDA
Orden: MYRTALES
Familia: MIRTACEAE
Subfamilia: LEPTOSPERMOIDEAE
Sección: MACRANTHERAE
Subsección: TERETICORNES
Serie: EXSERTAE
Género: *Eucalyptus*
Especie: *Eucalyptus citriodora* Hook

NOMBRE VULGAR:
Lemon-scented gum

DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA:

Su hábitat natural es centro y costas del norte de Australia. Pero fue introducido y se encuentra ampliamente en África, Brasil, México, California, Hawaii, India y Portugal (Duke 1983).

DESCRIPCIÓN DEL ÁRBOL:

Eucalyptus citriodora es fácil de reconocer por sus hojas que huelen a limón y sus semillas grandes. Árbol de 20 a 40 m de altura y de 0.6-1.3 m de diámetro. Tiene buena forma, con troncos rectos y cilíndricos y copas abiertas y ligeras.

La corteza es lisa, de color gris blanquecina y a veces color rosa claro y brillante en toda la superficie del tronco; caduca, desprendiéndose en pequeñas placas, exponiendo capa interna blanquecina o ligeramente azulada con superficie quebradiza (Bové 2000).

Madera adulta muy dura de color claro. Ramas delgadas, ligeramente aplastadas, de color verde claro, matizado con color café (Duke 1983).

Hojas jóvenes no opuestas, en más de 4 o 5 pares, pecioladas, lanceoladas, anchas, algunas peltadas, rugulas y pelosas, especialmente en las nervaduras y en los bordes, con fuerte olor a citronela; de 0.07-0.15 m por 0.03-0.06 m. Hojas adultas alternas, pecioladas, lanceoladas, con fuerte olor a citronela, de 0.10-0.25 m por 0.01-0.04 m, con nervadura fina y bastante regular (45° a 60°).

Inflorescencias terminales, en corimbos hasta 0.06m, compuestas de grupos de 3 a 5 flores con pedúnculo subcilíndrico, de 5 a 8 mm. Yemas con pedicelos de 7 a 8 mm de diámetro, opérculo hemisférico aplastado, más o menos apiculado. Anteras: macranteras.

Frutos con pedicelo corto atenuado, a veces truncado, receptáculo cilíndrico, urceolazo a ovoide o turbinado, de 10-12 mm de diámetro por 8-10 mm de altura, café, disco deprimido oblicuamente, valvas inclusas (FAO 1956; Little 1983).

USOS:

Esta especie, originaria de Queensland, Australia, puede proveer un buen fuste de madera dura y, al mismo tiempo, *E. citriodora* es famoso por el aceite esencial que produce, que huele a limón y que es usado para hacer perfumes, productos cosméticos e insecticidas.

De sus hojas se puede extraer una esencia que posee valor comercial cuando su contenido de citronelal es superior al 60%. Las hojas y las ramas terminales de los árboles de *E. citriodora* rinden entre 1 y 1.3% de esencia, pudiendo llegar a 2% en árboles cultivados. El principal componente de la esencia es el citronelal, cuyo contenido puede ascender hasta el 85%, aunque se han observado muestras de bajo contenido de este aldehído.

Un informe de la FAO (1981) en cuanto a las posibilidades de plantación, revela que el *E. citriodora* se cruza con otros miembros del subgénero *Corymbia* de Pryor y Johnston, razón por la cuál, para desarrollar una industria útil para la destilación de las hojas, la especie debe mantenerse pura. (Jiménez 1998). También, al igual que otros Eucaliptos, produce una miel muy buena. No es bueno como rompevientos, porque tiene una copa muy ligera.

La madera de *E. citriodora* es muy buena. Es fácil de aserrar, densa (1.0 g/cm³) y no es común que se raje, pero es necesario mantenerla prensada y secarla bajo sombra, y que no este en contacto con la tierra. Tiene un color castaño-rojizo con vetas oscuras. Es fácil impregnarla para aumentar su durabilidad.

La madera se usa para mueblería, construcción pesada, fabricación de herramientas y postes. Ya hay plantaciones grandes de *E. citriodora* en varios países para la producción de madera. Aunque no se ha probado en Honduras, el porte del árbol y su densidad cuando es maduro sugieren que esta especie podría usarse como postes de transmisión (Bovée 2000).

Según el Ministerio de Agricultura y Ganadería de Salvador la madera de *E. citriodora* es resistente a la pudrición y a las termitas, el aroma de las hojas y corteza son un repelente de zancudos y mosquitos, es una madera de aserrío de buena calidad y se usa en la construcción en general, mangos de herramientas, durmientes de ferrocarril, se tornea fácilmente y produce postes rectos que pueden impregnarse fácilmente a presión.

Es utilizada como combustible, arde en forma constante y se utiliza para la producción de carbón. *E. citriodora* se usa mucho en la medicina natural. Está reportado como antiséptico y fumigante. Las hojas se usan para inhalación de vapor contra diferentes problemas pulmonares. El extracto acuoso hervido de hojas también se usa para enfermedades pulmonares. En Cuba las hojas se usan también contra las úlceras y otras enfermedades de la piel (Morton 1981).

Los extractos de las hojas administrados oralmente a los conejos con diabetes inducida, producía hipoglucemia y reducía niveles de azúcar en la sangre (Watt, Breyer-Brandwijk 1962). Myrtillin en extractos de hojas produce hipoglucemia temporal (Atal, Kapur 1982).

2.2 *Eucalyptus robusta* Smith.

En la figura 2 se presenta un ejemplar de *Eucalyptus robusta* Smith.

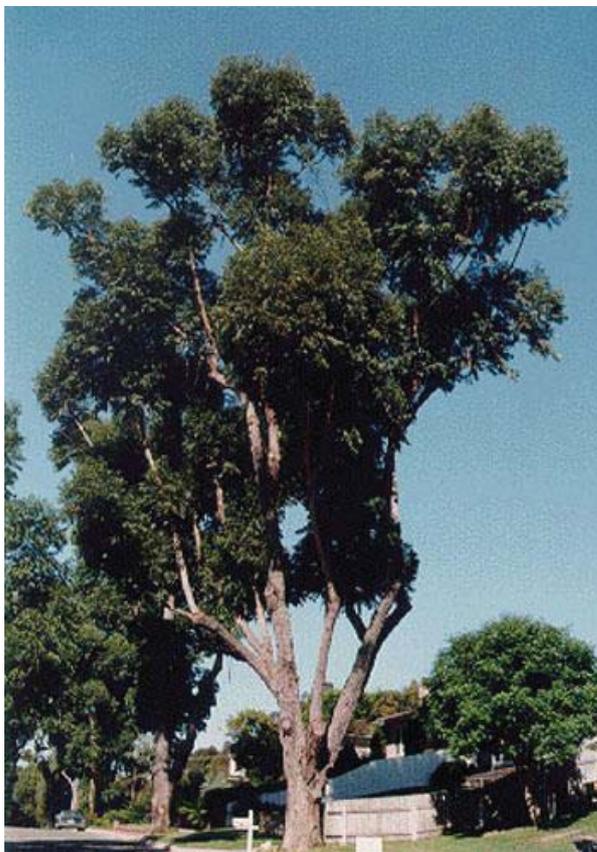


Figura 2. Árbol de *Eucalyptus robusta* Smith.

TAXONOMIA.

Reino: PLANTAE
División: MAGNOLIOPHYTA
Clase: MAGNOLIOSIDA
Orden: MYRTALES
Familia: MIRTACEAE
Subfamilia: LEPTOSPERMOIDEAE
Sección: MACRANTHERAE
Subsección: TERETICORNES
Serie: EXSERTAE
Género: *Eucalyptus*
Especie: *Eucalyptus robusta* Smith

NOMBRE VULGAR:
Swamp Mahogany, Iron bark

DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA:

Nativo del sudeste de Australia, donde crecía en zonas costeras a alturas de 0-100 metros sobre el nivel del mar, fue ampliamente introducido en áreas tropicales y subtropicales. Según Little (1983) es la especie mejor adaptada en Puerto Rico. Se cultiva en Angóla, Argentina, Arizona, Brasil, California, Camerún, China, Congo, Costa Rica, Florida, Ghana, India, Indonesia, Israel, Ivory Coast, Malagasy, Malasia, Mauritius, New Hebrides, Nigeria, Perú, Filipinas, Puerto Rico, Sri Lanka, Tanzania, México y Vietnam (Duke 1983).

DESCRIPCIÓN:

Árbol de 25 a 30 metros de altura, porte muy erecto y de 0.90 a 1.20 metros de diámetro. Corteza persistente, de color oscuro, fibrosa y con surcos profundos. Madera adulta dura, de color pardo rojo y durable.

Hojas jóvenes no opuestas, en más de cinco pares, pecioladas, lanceoladas, más o menos elípticas a ovales, de 0.10 m por 0.03-0.07 m aproximadamente.

Hojas adultas son alternas, pecioladas, lanceoladas anchas, gruesas, de color verde oscuro y brillante por la haz y verde pálido mate por el envés; de 0.10 a 0.18 m por 0.04-0.08 m; nervadura bastante regular, patente (60°).

Inflorescencias en umbelas axilares o subterminales, de 5 a 10 flores, pedúnculo aplastado, de 20 a 30 mm de longitud. Yemas pediceladas, de 7 a 10 mm de diámetro; opérculo cónico agudo, rostrado o corniforme. Anteras macranteras.

Frutos con pedicelo corto atenuado o truncado; receptáculo cilíndrico, urceolado a veces, o claviforme, de 10 a 12 mm de diámetro de altura, disco oblicuo deprimido, valvulas inclusas, deshilachadas, a menudo unidas por los extremos y sobresaliendo por el borde del receptáculo (FAO 1956).

USOS:

Es uno de los más ampliamente plantados eucaliptos, tiene madera dura y pesada, (grav. esp. 0.51) la cual es fuerte pero frágil y dura, elástica, con textura áspera, y bastante vetado recto pero con algunos inter cruzamientos.

Difícil para secar y rajarse, se trabaja bien y toma un buen brillo, y es durable en contacto con el piso. La madera es utilizada en construcción general, para apilado bajo tierra, postes de utilidad, postes para cercas, y leña. Es un árbol productor de miel atractivamente ornamental, también plantado como rompevientos. La planta es utilizada como un insecticida en China (Perry 1980).

2.3 *Eucalyptus saligna* Smith.

En la figura 3 se presenta un ejemplar de *Eucalyptus saligna* Smith.



Figura 3. Árbol de *Eucalyptus saligna* Smith.

TAXONOMIA.

Reino: PLANTAE
División: MAGNOLIOPHYTA
Clase: MAGNOLIOSIDA
Orden: MYRTALES
Familia: MIRTACEAE
Subfamilia: LEPTOSPERMOIDEAE
Sección: MACRANTHERAE
Subsección: TERETICORNES
Serie: EXSERTAE
Género: *Eucalyptus*
Especie: *Eucalyptus saligna* Smith

NOMBRE VULGAR:

Blue gum eucalyptus, Sydney blue gum.

DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA:

Nativo del sudeste de Australia, crece a alturas al nivel del mar hasta 1,000 m. Introducido en Argentina, Brasil, California, Guyana, Hawaii, India, Indonesia, Nueva Zelanda, Sudáfrica, Sri Lanka y México (Duke 1983).

DESCRIPCIÓN:

Árbol de 35 a 55 m de altura y 1.2 a 1.5 de diámetro. Corteza caduca, desprendiéndose en placas alargadas, salvo, a veces, en la base del tronco, y de color claro con reflejos anaranjados y azulados. Madera adulta es dura y de color rojo.

Hojas jóvenes no opuestas, en más de cuatro pares, con pecíolos cortos, lanceoladas anchas, finas, undadas, de color verde pálido y de 0.03 a 0.06 m por 0.02 a 0.03 m.

Hojas adultas alternas, pecioladas, lanceoladas estrechas, de 0.1 a 0.2 m por 0.015 a 0.03 cm; nervadura fina y regular (60°).

Inflorescencias en umbelas axilares, de 3 a 9 flores; pedúnculo aplastado, anguloso, de 8 a 12 mm. Yemas sésiles o con pedicelos cortos, de 4 a 5 mm de diámetro; opérculo en forma de casquete hemisférico apiculado o rostrado, tan largo como el receptáculo. Anteras: macranteras.

Frutos sésiles o con pedicelos muy cortos; receptáculo ovoide o cilíndrico, ligeramente campanulado, de 5 a 6 mm de diámetro por 5 a 6 mm de altura; disco plano y bastante fino, valvas exertas y por general a nivel (FAO 1956).

USOS:

E. saligna es una fuente importante de madera de construcción en Australia, la madera de duramen se usa para diferentes propósitos. Se usa mucho para ebanistería, elaboración de muebles, construcción naval, producción de chapa, elaboración de pisos y escaleras (Duke 1983).

Es buena planta productora de miel, se usa también como árbol ornamental y para dar sombra (Little 1983).

En Sudáfrica se usa mucho para producción de pulpa para papel y para producción de seda artificial (Watt, Breyer-Brandwijk 1962).

El aceite de *E. saligna* tiene propiedades insecticidas contra chinches, escarabajos negros, piojos, y mosquitos (Kambu *et al.* 1982).

3. ANTECEDENTES

Eucalyptus citriodora.

Watt, Breyer-Brandwijk (1962), reporta que la corteza contiene 9% de taninos, la hoja joven contiene ácidos cítrico, glutárico, málico, quínico, chiquímico (carcinogénico), y succínico. Las hojas y frutos también contienen flavonoides y esteroides.

En hojas de *E. citriodora* se encuentran ácido betulínico y ursólico, eucalyptin y β -sitosterol. Hojas glabras pueden contener aceite con 65.5% de citronelal, 12.2% citronelol, y 3.6% isopulegol; hojas pilosas contienen más aceite con 86.6–90.1% citronelal, 4.6–6.0% citronelol, y 0.7–0.8% isopulegol, 1-pinene, β -pinene, y aldehído isovalerico (Morton 1981).

Pereira *et al.* (2000), indican para madera en árboles de 10.5 años de *E. citriodora* contenido de lignina de 22.4%, contenido de polisacáridos de fácil hidrolización de 26.4%, polisacáridos de difícil hidrolización de 44.9%, contenido de pentosanos de 21.2%, poder calorífico superior de la madera 4718 cal/g, y contenido de cenizas de 1.6%.

Da Silva *et al.* (2005), encontraron en madera de *E. citriodora* 13.9 % de extractivos en metanol y según Reis (1973) el contenido de extractivos en metanol es 11.1% en árboles de 11 años.

Eucalyptus robusta.

El quino contiene el antibiótico citriodorol. Las hojas y frutos contienen flavonoides, esteroides, y taninos. La corteza contiene solamente 1.4% de taninos, mientras que las hojas pueden contener hasta 12% (Watt, Breyer-Brandwijk 1962). Las hojas contienen 0.16% de aceite esencial, con aromadendren (o aromadendral) y pineno.

Little (1983), menciona los usos de esta especie como combustible, pero éste no se recomienda por NAS. La madera con densidad de 0.53 g/cm^3 de *E. robusta* tiene valor calorífico de 19,628 kJ/kg, y la corteza con densidad de 0.22 g/cm^3 , tiene valor calorífico de 18,074 kJ/kg (Wang *et al.* 1982).

Trugilho *et al.* (2000), analizan varias especies de eucaliptos y reportan contenido de extraíbles en madera de *E. robusta* en agua fría de 1.15%, y en tolueno de 0.13%.

Eucalyptus saligna.

Migliorini *et al.* (1980), evaluaron el potencial energético de algunas especies de *Eucalyptus* de tres años de edad, entre ellos *E. saligna*, *E. robusta* y *E. citriodora* y concluyeron que *E. saligna* mostró los mejores resultados como combustible, *E. robusta* el menor rendimiento y *E. citriodora* el peor. El poder calorífico de *E. saligna* en promedio es de 18,390.0 kJ/kg, siendo de lenta combustión y rápido encendido.

Las hojas contienen 0.12% de aceite esencial, están largamente compuestas de α -pineno y p-cimeno. Kambu *et al.* (1982), indican que contiene 1,8-cineole, borneol, α -terpineol, y linalol. La corteza contiene 5.9-8.4% de taninos.

Pereira *et al.* (2000), reportan en madera de *E. saligna* de 10.5 años un contenido de lignina de 26.3 %, contenido de cenizas de 0.5%, polisacáridos de fácil hidrolizado 22.2%, polisacáridos de difícil hidrolizado 44.8%, pentosanos 16.2% y poder calorífico superior de 4633 cal/g.

Otros reportes alusivos a composición química, realizados con especies de Eucalipto son citados a continuación.

Dadswell *et al.* (1962), encontraron que para *E. regnans* los contenidos de hemicelulosas oscilan entre 14 y 20 %, las holocelulosas de un 75 a 82 %, y la lignina de 20 a 27 %.

Por otro lado, el mismo autor señala que las variaciones en las sustancias minerales pueden deberse a la humedad no detectada en la madera, así como a la fertilidad del suelo donde se desarrolla la planta.

Swan *et al.* (1967), comunican que en las maderas de eucalipto se ha encontrado gran diversidad de compuestos, siendo fundamentalmente taninos condensados, ácidos terpénicos, vainillina, ácido sirínico y sitosterol entre otros.

Dillner *et al.* (1970), publican en Portugal, valores de celulosa entre 36 y 57 % en maderas de *E. globulus* Labill.

Bamber, Curtin (1974), reportan que el contenido de extraíbles en el *E. pelularis* (de Australia) varió en un rango de 7.4 % y 8.4 % en el duramen, hasta 2.9 % en la albura.

Tischler (1976) citado por Hillis (1984), encuentra que las sustancias solubles en agua caliente para el exterior del duramen en *E. camaldulensis* con edades entre 18 y 20 años en Israel, fueron mayores de 14.3 % y en el interior del duramen de 12.1 %. Y para la albura obtuvo el valor de 7.4%.

Hillis (1984), menciona que los contenidos de celulosa, hemicelulosa y lignina en los Eucaliptos varían en rangos apreciables, siendo así que para la celulosa se puede encontrar entre 40 y 60 %; para las hemicelulosas entre 12 y 22 % y en lignina entre 15 y 22%.

Siendo que la lignina de los Eucaliptos es del tipo siringil – guayacil (G-S) con menor variación dentro del mismo árbol, dicha variación puede incrementarse entre especie y entre árboles. La variación en los contenidos de lignina dentro del propio árbol puede diferir, afectando su desarrollo y ocasionando su debilitamiento (Hillis 1984; Bland 1985).

Pereira, Sardinhas (1984), estudiando la composición química del *E. globulus* Labill a seis alturas del fuste, en España, encontró irregularidades en la variación de dicha composición de las sustancias extraíbles, sucediendo lo mismo al estudiar la composición del *E. saligna* Smith, donde encontró mayores variaciones atribuyéndolas a las características anatómicas de la fibra en esta madera. Y refiriéndose a los componentes de la pared celular, encontró una ligera disminución con la altura del contenido de celulosa, corroborando los resultados reportados por Sardinhas (1979).

Wilkes (1984), compara el contenido de extractivos y la densidad básica de la albura y el duramen exterior para un árbol de rápido crecimiento y un árbol de crecimiento lento de cada una de seis especies de eucaliptos, *E. albens* Benth., *E. bancroftii* Maid., *E. dealbata* A. Cunn. ex Schau., *E. goniocalyx* F. Muell. ex Miq., *E. macrorhyncha* F. Muell. ex Benth., y *E. sideroxylon* A. Cunn. ex Wolls, determinando que la proporción de crecimiento no influye apreciablemente en la densidad de la madera extraída, aunque los niveles de extractivos del duramen exterior fueron significativamente más altos en los fustes más grandes.

Pereira (1988), reporta variaciones en la composición química al estudiar *E. globulus* a diferentes edades del árbol, a diferentes alturas y en diferentes sitios de crecimiento, observando un incremento de extraíbles y ligeras variaciones en los componentes de la pared celular con la edad del árbol y pequeñas variaciones a lo largo del fuste.

Krilov, Lasander (1989), estudian la concentración, la distribución y la variabilidad de los compuestos fenólicos solubles en butanol en el duramen de Eucalipto (*E. acmenioides*, *E. macrorhyncha*, *E. oblicua*, *E. pilularis* y *E. grandis*), los cuales es probable que sean los responsables de los efectos de corrosión de la madera y el metal, donde encontraron que uno de los compuestos fenólicos más activos en el proceso de corrosión es el ácido gálico, muestran que el patrón de su distribución dentro de diferentes especies varía considerablemente y provee la posibilidad de medir estas maderas de acuerdo a sus propiedades de corrosión que están basadas esencialmente en su respectivo contenido de ácido gálico.

Yoshinaga *et al.* (1993), años anteriores obtienen resultados similares a los mencionados por Ona *et al.* (1995b) trabajando con *E. camaldulensis* a 12 alturas distintas.

Ona *et al.* (1995b), estudió los contenidos de lignina a lo largo del fuste observando también ciertas variaciones, con valores que oscilan entre 21.6% y 42.8%, realizando 10 mediciones a lo largo del fuste del árbol en el *E. globulus* Labill procedente de Australia.

Conde *et al.* (1995), realizan un estudio utilizando madera de *E. globulus* para determinar polifenoles de bajo peso molecular, reportando que el contenido de fenoles es más alto en la corteza que en la madera, debiéndose probablemente a la alta concentración de polifenoles poliméricos como los taninos; mencionan también que los principales componentes en extractos de la madera y corteza son el ácido elágico y elagitaninos, y que la variedad y cantidad de flavonoides es mayor en la corteza.

Penner (1996), menciona que las hemicelulosas de eucalipto contienen alta proporción de grupos capaces de producir ácido acético, debido a la presencia de O-acetil-4-O-metilglucuronoxilano.

En los extractos alcohólicos de las maderas de Eucalipto se encuentran fenoles y principalmente polifenoles polimerizados y ocasionalmente otros compuestos.

La fracción de polifenoles contiene frecuentemente flavonoides polimerizados, también ácido gálico, ácido hexahidroxidifénico y sus derivados, según reporta Hillis (1984), quien también menciona que en *E. saligna* Smith, *E. diversicolor*, *E. grandis* y *E. camaldulensis* se encuentran grandes proporciones de flavonoides, con significativas cantidades de ácido elágico, metilelágico, ácido gálico y elagitaninos (Stafford, Pazoles 1997).

Ona *et al.* (1997), reportó, que los contenidos de sustancias extraíbles para *E. globulus* Labill y *E. camaldulensis*, muestran diferencias porcentuales entre especies, dichas diferencias disminuyen dentro del mismo árbol y a diferentes alturas estudiadas.

Gutiérrez *et al.* (1999), estudian la composición química de los extractivos lipofílicos de la madera de *E. globulus* Labill., reportando que los principales componentes identificados incluyen esteroides, esteres esterol, ácidos grasos, cetonas esteroides, hidrocarburos y triglicéridos, también compuestos menores tales como alcoholes grasos, mono y diglicéridos, además de ceras y tocoferoles entre los lípidos de dicha especie.

Valerio (2003), realiza la determinación de taninos condensados en maderas de *E. grandis*, *E. saligna* y *E. urophylla*.

4. OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar la composición química del duramen y la albura de tres especies de eucalipto, en dos diferentes alturas del fuste, provenientes de la plantación experimental de Crisoba Industrial, Morelia.

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 4.2.1 Medir el pH
- 4.2.2 Determinar el contenido de sustancias inorgánicas
- 4.2.3 Determinar la solubilidad en solventes orgánicos y en agua caliente
- 4.2.4 Determinar el contenido de lignina
- 4.2.5 Determinar el contenido de holocelulosa
- 4.2.6 Cuantificar el contenido de azúcares
- 4.2.7 Determinar el poder calorífico de la madera

5. JUSTIFICACIÓN

Introducido en México a finales del siglo antepasado, el género *Eucalyptus* comprende gran número de especies diseminadas en el mundo, 700 aproximadamente, encontrándose en el territorio nacional 75 de ellas (Macías 1993).

Actualmente en Michoacán y en todo el país, esta especie ha despertado el interés en cuanto a sus posibilidades de utilización al ser un árbol de rápido crecimiento, que puede alcanzar en corto tiempo (7-9 años) un tamaño adecuado para su aprovechamiento, a comparación con otras especies que requieren de 15 a 20 años, o más, para estar aptas y poder ser utilizadas.

El eucalipto proporciona un sinnúmero de usos, entre los que se encuentra la producción de pulpa para elaborar papel, sin embargo estos majestuosos árboles pueden considerarse para su utilización en otros ámbitos industriales como la producción y generación de energía, que en la actualidad ha tomado auge por la gran cantidad de biomasa que se genera en los procesos de tala y de transformación industrial teniendo gran potencial desde el punto de vista técnico, económico, ambiental y social. Por eso es importante la valoración del potencial energético de la madera de las especies señaladas.

Por otra parte se considera importante contribuir al conocimiento del aspecto químico de *Eucalyptus citriodora*, *E. robusta* y *E. saligna* porque se pueden encontrar muchos usos a las sustancias extraídas de estos árboles y así se podría dar aprovechamiento integral y con más valor agregado a los árboles de estudio.

6. METODOLOGÍA

6.1 Recolección y preparación del material de estudio

Se derribó un árbol de cada especie de Eucalipto de la plantación experimental forestal de la empresa Crisoba Industrial, S. A., planta Morelia, ubicada en la región central del Estado de Michoacán, dentro del municipio de Morelia, en la porción poniente de la ciudad, colindando con los siguientes poblados:

Al Norte con San Juanito Itzicuaró, al Sur con Cointzio, al Este con Morelos y al Oeste con la Mintzita.

Los árboles seleccionados presentaron fustes rectos, no tenían enfermedades, ni plagas y contaban con edad de 7 años. Una vez derribados, se obtuvieron dos rodajas de 30 cm de largo aproximadamente, a dos alturas del árbol; además de coleccionar material botánico para su respectiva identificación llevada a cabo por la M. en C. Patricia Silva Sáenz y el M. en C. Miguel Ángel Silva Farias. Los datos de recolección y muestreo de los árboles derribados se presentan en la tabla 1.

Tabla 1. Datos de recolección y muestreo de los Eucaliptos

Especie	Altura total (m)	Diámetro DAP (cm)	Altura 1a troza (altura del tocón) (m)	Altura 2a troza (m)
<i>E. citriodora</i>	22.5	25.0	1.2	6.3
<i>E. robusta</i>	18.0	19.4	1.2	6.3
<i>E. saligna</i>	31.5	21.0	1.2	6.3

DAP: Diámetro a la altura del pecho



Figura 4. Imágenes en plano transversal de la madera de los tres Eucaliptos a) *E. citriodora*, b) *E. robusta*, y c) *E. saligna* (Fotos: Irak C. R.)

Teniendo las rodajas de las especies que constituyen el material de estudio (Figura 4), siendo 6 en total, para llevar a cabo el análisis químico, se procedió a separar, de las respectivas rodajas de las tres especies, la corteza, la albura y el duramen, para posteriormente someter el material a un astillado con formón y martillo con la finalidad de obtener astillas de dimensiones adecuadas para molerlas en un molino Retsch (Figura 5), hasta obtener harina de madera, que posteriormente se clasificó en tres diferentes tamaños de partícula (malla 20,

40 y 60), utilizando una criba vibratoria mecánica marca Rotap modelo Ra-29 serie 2240 con control de tiempo de operación (Figura 6).

Seleccionando para el análisis únicamente la harina que pasó por la malla 40 (tamaño de partícula $420\ \mu\text{m}$) y se retuvo en la malla 60, almacenándola en bolsas de plástico y sellándolas debidamente para evitar así la humedad y posible contaminación. La preparación del material para los ensayos se realizó con apego a la norma T 264 cm-97 (TAPPI 2000), siguiendo el diagrama general para el análisis mostrado en la figura 8.



Figura 5. Molino Retsch.



Figura 6. Criba Vibratoria Rotap.

6.2 Propiedades químicas de las especies

Antes de iniciar el análisis químico, se llevó a cabo la determinación del % de humedad del material de estudio (en especies, altura y zonas) siguiendo el método de deshidratación a $103\ ^\circ\text{C}$ (Figura 7). El material utilizado para determinar la humedad no fue empleado para realizar los ensayos químicos.



Figura 7. Secuencia seguida para la determinación del % de humedad (Fotos: Irak C. R.)

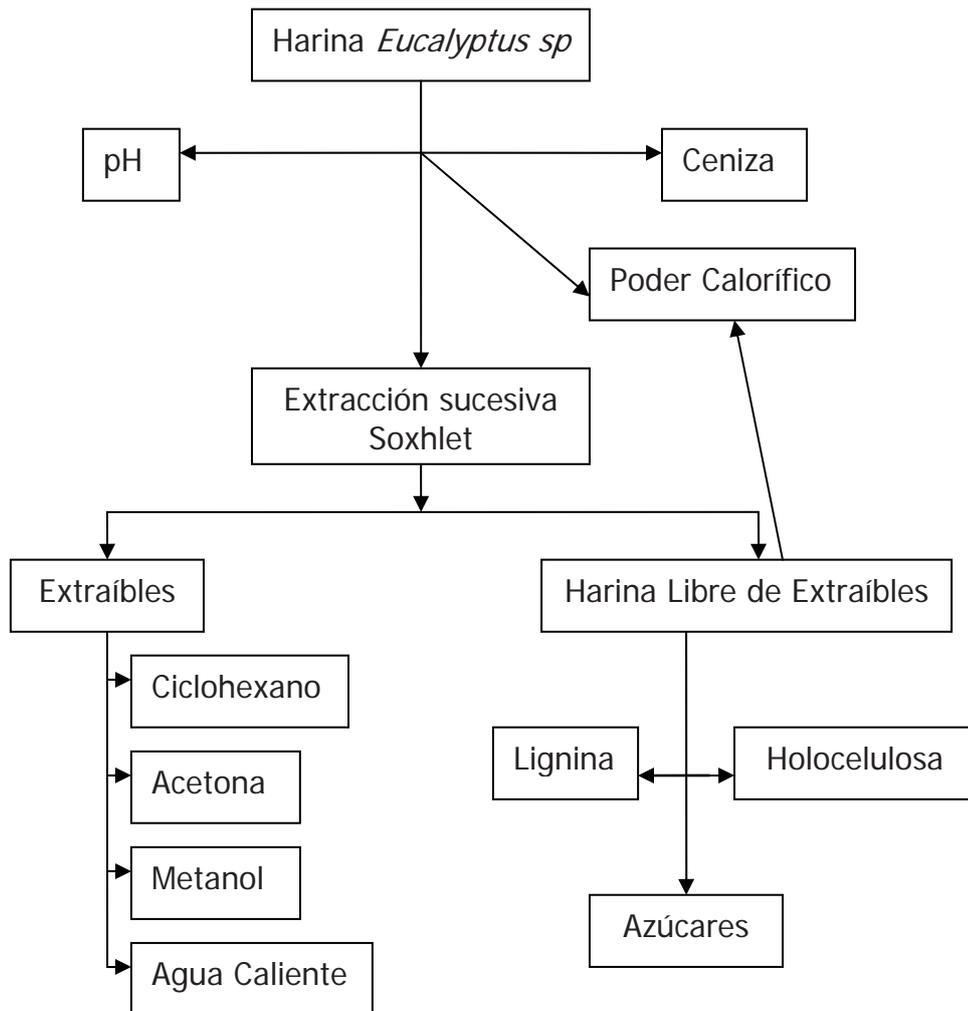


Figura 8. Diagrama general para el análisis químico de los *Eucalyptus*.

A fin de determinar diferencias estadísticas en las propiedades químicas, en la misma especie y entre las especies, se aplicó un diseño experimental factorial 3x2x2, con n = a 1 réplica; teniendo los siguientes factores y niveles:

A = especies (tres especies)

B = altura (baja y alta)

C = zonas de toma de muestras (albura y duramen)

De acuerdo con lo anterior, el modelo estadístico correspondiente a tal diseño (Montgomery 1991) es el siguiente:

$$Y_{ijkl} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + (\alpha\beta)_{ij} + (\alpha\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\alpha\beta\gamma)_{ijk} + \varepsilon_{ijkl}, \text{ donde:}$$

Y_{ijkl} = variable de respuesta

μ = media general

α_i = efecto de la especie

β_j = efecto de la altura

γ_k = efecto de la zona

$(\alpha\beta)_{ij}$ = efecto de la interacción AB

$(\alpha\gamma)_{ik}$ = efecto de la interacción AC

$(\beta\gamma)_{jk}$ = efecto de la interacción BC

$(\alpha\beta\gamma)_{ijk}$ = efecto de la interacción ABC

ε_{ijkl} = error aleatorio

Las hipótesis estadísticas de interés, que se pueden probar con tal modelo estadístico, se ilustran a continuación.

H_0 : efecto de especie (A) = 0

H_1 : efecto de especie (A) \neq 0

H_0 : efecto de altura (B) = 0

H_1 : efecto de altura (B) \neq 0

H_0 : efecto de zona (C) = 0

H_1 : efecto de zona (C) \neq 0

H_0 : efecto de interacción (AB) = 0

H_1 : efecto de interacción (AB) \neq 0

H_0 : efecto de interacción (AC) = 0

H_1 : efecto de interacción (AC) \neq 0

H_0 : efecto de interacción (BC) = 0

H_1 : efecto de interacción (BC) \neq 0

H_0 : efecto de interacción (ABC) = 0

H_1 : efecto de interacción (ABC) \neq 0

Teniendo como variables de respuesta: pH, contenido de cenizas, contenido total de extractivos, así como el contenido de lignina y el contenido de holocelulosa.

Para la comparación de medias del efecto significativo se aplicó el método de la mínima diferencia significativa (LSD) (Montgomery 1991); y los datos se analizaron con un nivel de confianza del 95 %, los resultados se llevaron a cabo mediante el programa Statgraphics plus versión 4.

6.2.1 Determinación del pH

La determinación del pH (Moisture pH; MpH) en la madera se hizo de acuerdo al método Sandermann y Rothkamm (1959) y se midió con un potenciómetro marca HANNA, modelo pH 211 tomando lecturas iniciales, posteriormente a los 5 minutos, a las 4 hrs., 24 hrs., y 48 hrs. consecutivamente (Figura 9).



Figura 9. Potenciómetro para medir el pH (Fotos: Irak C. R.)

6.2.2 Determinación del contenido de cenizas.

El contenido de cenizas de la madera se llevó a cabo gravimétricamente, después de quemar cuidadosamente las muestras en placas de calentamiento, utilizando crisoles de níquel, para posteriormente calcinar el carbón en una mufla marca Lindberg a 525 °C, siguiendo la norma T 211 om-93 (TAPPI 2000) (Figura 10).





Figura 10. Secuencia seguida para la obtención de cenizas (Fotos: Irak C. R.)

6.2.3 Obtención de extraíbles

Las determinaciones de extraíbles se realizaron utilizando los siguientes solventes de polaridad creciente: Ciclohexano, Acetona, Metanol y Agua caliente de manera consecutiva.

Para los solventes orgánicos de polaridad creciente se empleó equipo Soxhlet y la extracción fue por un periodo de 4 horas (Figura 11). La extracción con agua caliente se hizo empleando condensadores refrigerantes y matraces de fondo de balón, durando también 4 horas a reflujo (Figura 12). Una vez concluidas las extracciones se obtuvo lo que se conoce como "harina libre de extraíbles".

Posteriormente los solventes se recuperaron en un rotavapor marca Heidolph aplicando vacío, y los matraces con el extracto fueron colocados en un desecador hasta tener peso constante.





Figura 11. Secuencia seguida para la extracción con Soxhlet (Fotos: Irak C. R.)



Figura 12. Secuencia seguida para la extracción con agua caliente (Fotos: Irak C. R.)

6.2.4 Determinación de lignina

El contenido de lignina insoluble de la madera se efectuó siguiendo la técnica de Runkel y Wilke (1951), en la cual pesando 1gr de harina se agregan 50 ml de ácido sulfúrico al 72% y 5 ml de ácido bromhídrico al 40%, a la muestra, para posteriormente hervirla con agua destilada por 5 minutos y finalmente filtrarla en filtros Buchner para llevarla a peso constante en un horno a 103 °C (Figura 13).



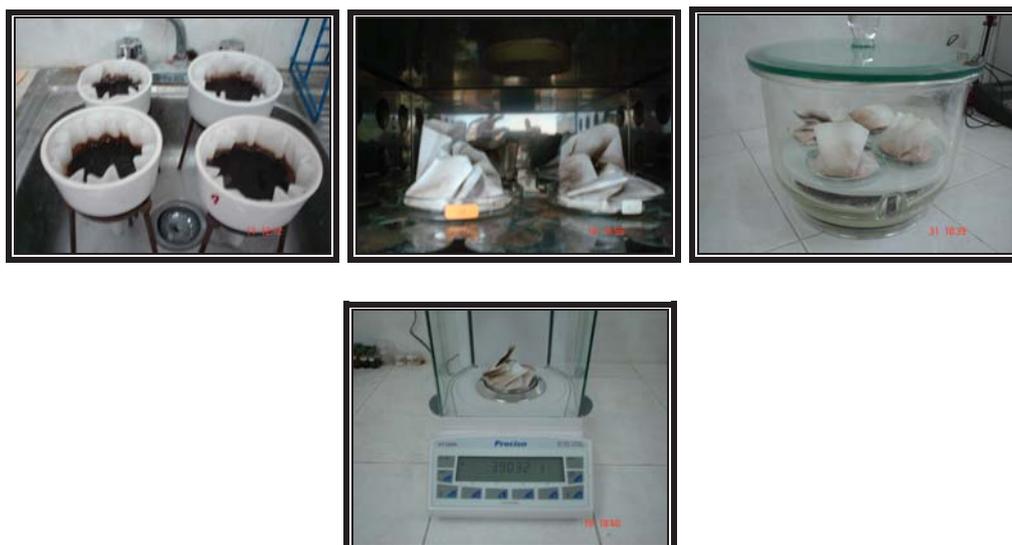


Figura 13. Secuencia seguida para la obtención de lignina (Fotos: Irak C. R.)

6.2.5 Determinación de holocelulosa

El contenido de holocelulosa de la madera se determinó con apoyo en la norma ASTM D 1104-57 (2000), sustituyendo el empleo del cloro gas por hipoclorito de sodio, utilizando filtros de fondo poroso y haciendo vacío para facilitar el filtrado, posteriormente se llevaron las muestras a peso constante en un horno a 40 °C (Figura 14).

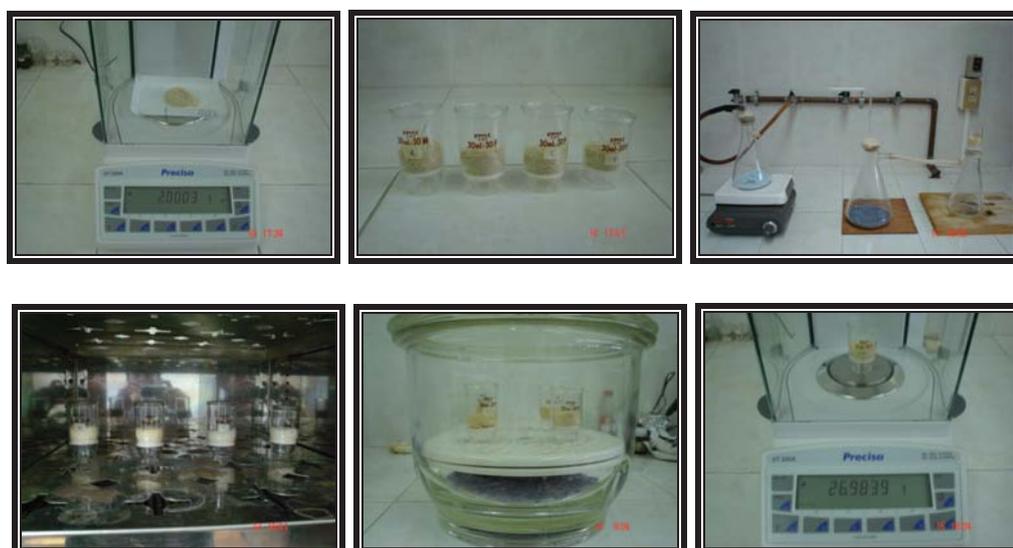


Figura 14. Secuencia seguida para la obtención de holocelulosa (Fotos: Irak C. R.)

6.2.6 Cuantificación e identificación de azúcares por HPLC

La identificación de polisacáridos se llevó a cabo con la harina libre de extraíbles, la cual fue obtenida después de realizar las extracciones con Soxhlet y agua caliente.

Se pesaron 0.3 gr de cada una de las muestras de harina de las maderas, se colocaron en tubos de ensayo y se sometieron a una hidrólisis ácida utilizando ácido sulfúrico (H_2SO_4) al 72% mediante una digestión de 1 hora, posteriormente se vertieron en matraces Erlenmeyer de 250 ml y se añadieron 84 ml de agua desionizada para diluir la muestra hidrolizada.

A su vez finalizada la digestión, se reforzó la hidrólisis con el uso de un autoclave durante una hora a 15 psi (7.5 kg/cm^2). Pasado el tiempo se enfrió y neutralizó a un pH de 5.5 con una solución saturada de hidróxido de bario (5.6 gr en 100 ml de agua).

Finalmente, se filtró en un aparato de filtración con microporo usando membranas de nylon de $0.45 \mu\text{m} \times 47 \text{ mm}$ de diámetro y así retirar toda partícula sólida presente en las soluciones, aforándose después a 250 ml. Cada muestra fue inyectada y analizada en el equipo de cromatografía líquida de alta presión (HPLC) marca Dionex 500 (Figura 15) del Laboratorio de Pulpas Ácidas del Departamento de Madera, Celulosa y Papel de la U de G, en Guadalajara, Jalisco.

La realización de este análisis se hizo formando estándares de comparación, de Arabinosa, Galactosa, Glucosa, Xilosa y Manosa; en una solución de 100 ppm inyectada previamente para calibrar el cromatógrafo. También se cuantificaron las cantidades de los azúcares mediante el software peak net, utilizando el método "Xilman 2.met".





Figura 15. Secuencia seguida para la cuantificación e identificación de azúcares (Fotos: Irak C. R.)

6.2.7 Determinación del poder calorífico

Ésta se realizó en una bomba calorimétrica de oxígeno, en apego a la Norma T-parr-1341 ns 78 (1978) utilizando harina de madera de la malla 40 sin extraer y libre de extraíbles, pesando 1.0 gr de muestra colocado en una cápsula.

La bomba se prepara colocando un alambre de fusión de 10 cm en los electrodos de la cabeza de la bomba, ligeramente tocando la muestra. Se añade 1 ml de agua destilada, se cierra herméticamente y se procede a llenar con oxígeno (siendo usualmente no más de 30 atm).

Se sumerge la bomba dentro de una cubeta que contiene dos kilogramos de agua pesados previamente, colocada dentro de la chaqueta. Se conectan los alambres de ignición en los dos enchufes terminales de la cabeza de la bomba, y se tapa el calorímetro con un termómetro puesto previamente mirando hacia el frente.

Así mismo, el agitador colocado en la tapa debe girar libremente, accionado por un motor, durante 5 minutos, para alcanzar el equilibrio térmico. Se toma el tiempo con un cronómetro y se lee la temperatura cada minuto por exactamente 5 minutos.

Se oprime el boton de ignición para hacer la explosión al inicio del sexto minuto, una vez llevadas a cabo las lecturas de temperatura, después de 5 minutos se vuelven a tomar las lecturas a intervalos de 1 minuto por un lapso de 5 minutos hasta que la diferencia entre lecturas es constante (Figura 16).

Finalmente, se lleva a cabo la apertura del calorímetro, se desahoga la presión de la bomba y se abre para hacer un lavado con un chorro de agua. Se toma una muestra de combustión y se titula con una solución estándar de carbonato de sodio, usando anaranjado de metilo como indicador.

Este ensayo se llevó a cabo en el Laboratorio de Pulpas Ácidas del Departamento de Madera, Celulosa y Papel de la U de G, en Guadalajara, Jalisco.



Figura 16. Detalles para preparar la bomba calorimétrica utilizada (Fotos: Irak C. R.)

7. RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados obtenidos del análisis químico de la albura y el duramen de las tres especies de eucalipto estudiadas. En las tablas y figuras aparece la nomenclatura E. ci, E. ro y E. sa, lo que significa *Eucalyptus citriodora*, *E. robusta* y *E. saligna*, respectivamente.

En las tablas 2 y 3 se presentan los valores promedio correspondientes a las dos alturas, de las determinaciones de pH, contenido de cenizas, holocelulosa y lignina. También se representan gráficamente en las figuras 17 y 18, respectivamente.

Posteriormente se presenta el análisis estadístico de los valores mencionados en las tablas para las propiedades químicas.

Tabla 2. Valores obtenidos de la composición química de la albura

Propiedades químicas de la Albura					
Especie	Parte	pH	Cenizas %	Lignina %	Holocelulosa %
<i>E. ci</i>	Baja	4.17	0.33	21.18	80.90
	Alta	4.83	0.35	19.87	78.35
<i>E. ro</i>	Baja	4.66	0.28	23.12	46.17
	Alta	4.69	0.27	21.61	40.58
<i>E. sa</i>	Baja	4.61	0.45	23.03	51.05
	Alta	4.72	0.47	21.88	48.09

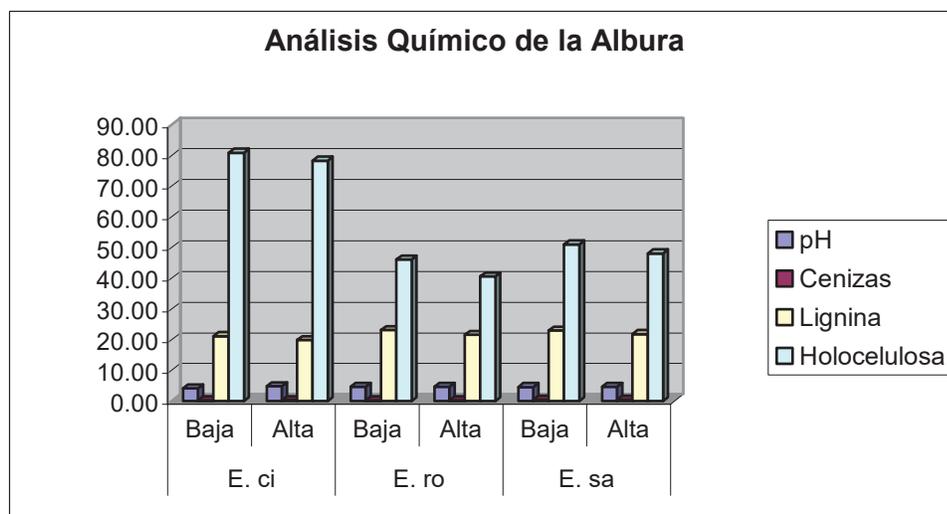
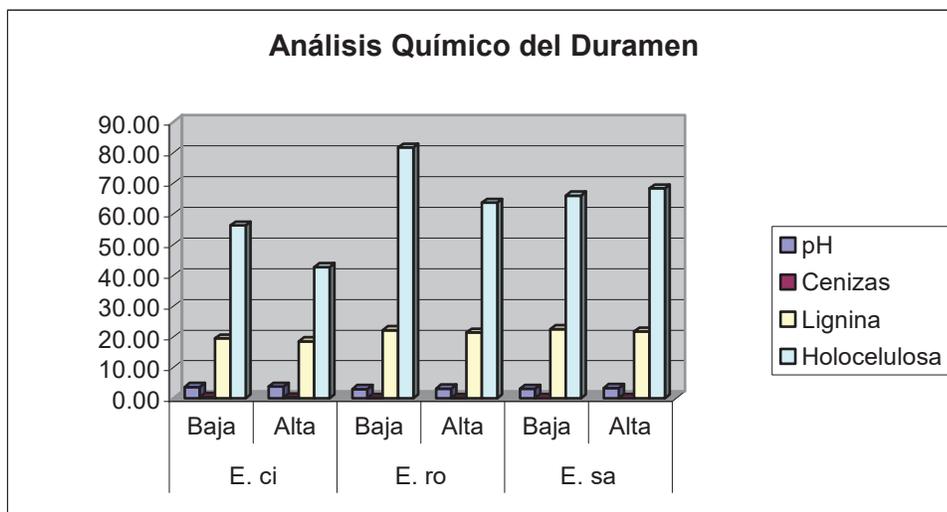


Figura 17. Representación gráfica de las propiedades químicas de la albura

Tabla 3. Valores obtenidos de la composición química del duramen

Propiedades químicas del Duramen					
Especie	Parte	pH	Cenizas %	Lignina %	Holocelulosa %
<i>E. ci</i>	Baja	3.77	0.50	19.52	56.33
	Alta	3.81	0.43	18.58	42.78
<i>E. ro</i>	Baja	3.04	0.26	22.22	81.69
	Alta	3.22	0.23	21.41	63.69
<i>E. sa</i>	Baja	3.18	0.15	22.56	66.03
	Alta	3.43	0.16	21.83	68.41

**Figura 18.** Representación gráfica de las propiedades químicas del duramen

7.1 pH

En la tabla 4 se presenta el análisis de varianza (Anova) para el caso del pH, donde se observa que el nivel de significancia calculado con los resultados obtenidos (p-Value) es menor para cada factor estudiado al nivel de significancia fijado para el análisis estadístico (0.05), por lo que la hipótesis formulada se rechaza, lo que significa que dichos factores (especie, altura, zona) si tienen efecto estadístico significativo en la variable de respuesta, que en este caso es el valor del pH; el mismo caso se observa para la interacción especie-zona. Para llevar a cabo la comparación de medias del efecto significativo de los factores, se aplicó el método de la mínima diferencia significativa (LSD) (Montgomery 1991), mostrando los resultados en las figuras 19, 20 y 21, así como en las tablas 5, 6 y 7.

Tabla 4. Análisis de varianza (Anova) para el pH

Analysis of Variance for pH - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A: Especie	0.250825	2	0.125412	4.63	0.0287
B: Altura	0.262504	1	0.262504	9.68	0.0077
C: Zona	8.7242	1	8.7242	321.75	0.0000
INTERACTIONS					
AB	0.0613583	2	0.0306792	1.13	0.3504
AC	0.756058	2	0.378029	13.94	0.0005
BC	0.0155042	1	0.0155042	0.57	0.4621
RESIDUAL	0.379608	14	0.0271149		
TOTAL (CORRECTED)	10.4501	23			
All F-ratios are based on the residual mean square error.					

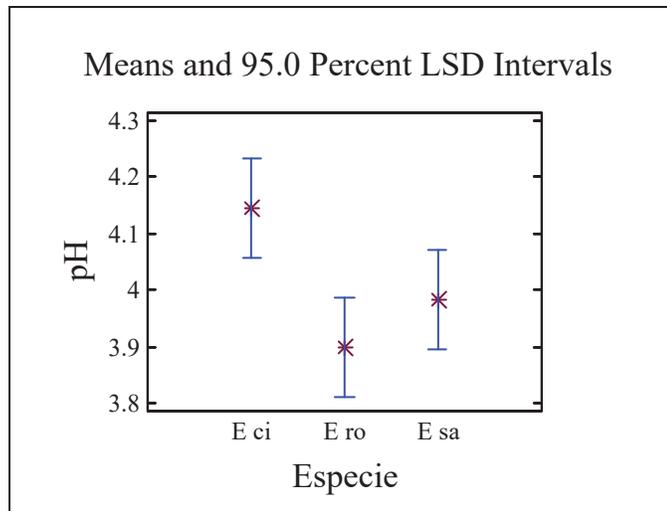


Figura 19. Efecto de la especie sobre el pH

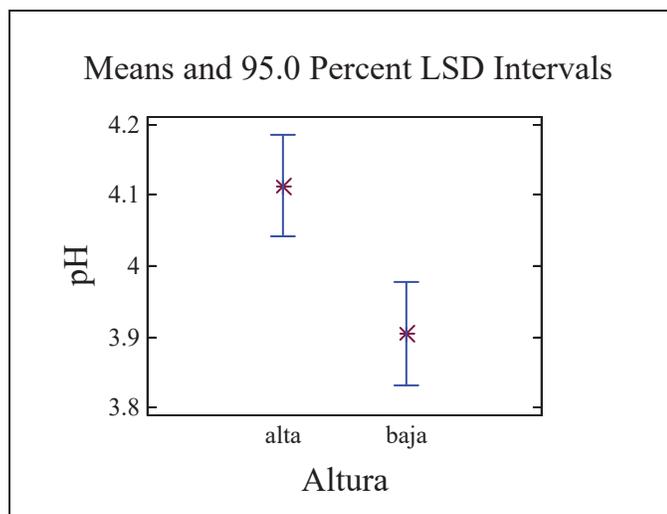


Figura 20. Efecto de la altura sobre el pH

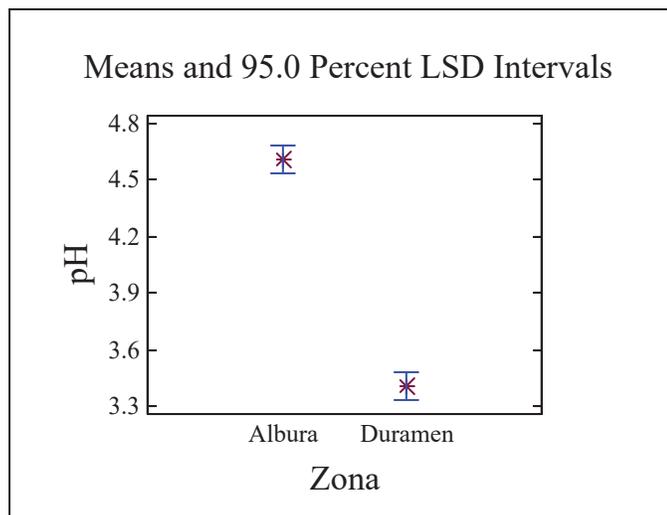


Figura 21. Efecto de la zona sobre el pH

Tabla 5. Prueba del rango múltiple para el pH por especie

Multiple Range Tests for pH by Especie			

Method: 95.0 percent LSD			
Especie	Count	LS Mean	Homogeneous Groups

E ro	8	3.89875	X
E sa	8	3.9825	XX
E ci	8	4.145	X

Contrast		Difference	+/- Limits

E ci - E ro		*0.24625	0.176587
E ci - E sa		0.1625	0.176587
E ro - E sa		-0.08375	0.176587

* denotes a statistically significant difference.			

Tabla 6. Prueba del rango múltiple para el pH por altura

Multiple Range Tests for pH by Altura			

Method: 95.0 percent LSD			
Altura	Count	LS Mean	Homogeneous Groups

baja	12	3.90417	X
alta	12	4.11333	X

Contrast		Difference	+/- Limits

alta - baja		*0.209167	0.144183

* denotes a statistically significant difference.			

Tabla 7. Prueba del rango múltiple para el pH por zona

Multiple Range Tests for pH by Zona			

Method: 95.0 percent LSD			
Zona	Count	LS Mean	Homogeneous Groups

Duramen	12	3.40583	X
Albura	12	4.61167	X

Contrast		Difference	+/- Limits

Albura - Duramen		*1.20583	0.144183

* denotes a statistically significant difference.			

7.2 Inorgánicos

En la tabla 8 que presenta el análisis de varianza (Anova) para la variable del contenido de cenizas, se observa que el nivel de significancia calculado con los resultados obtenidos (p-Value) nada más para los factores especie y zona es menor del nivel de significancia fijado para el análisis estadístico (0.05), por lo que la hipótesis formulada se rechaza, en el caso de los dos factores mencionados, indicando que dichos factores si tienen efecto estadístico significativo en la variable de respuesta, que en este caso es el valor del contenido de cenizas, el mismo caso se observa para las 3 interacciones. Para llevar a cabo la comparación de medias del efecto significativo de los factores, se aplicó el método de la mínima diferencia significativa (LSD) (Montgomery 1991), mostrando los resultados en las figuras 22, 23 y 24, así como en las tablas 9, 10 y 11.

Tabla 8. Análisis de varianza (Anova) para el contenido de cenizas

Analysis of Variance for Cenizas - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:Especie	0.0852583	2	0.0426292	172.57	0.0000
B:Altura	0.0006	1	0.0006	2.43	0.1414
C:Zona	0.0294	1	0.0294	119.02	0.0000
INTERACTIONS					
AB	0.001975	2	0.0009875	4.00	0.0423
AC	0.191275	2	0.0956375	387.16	0.0000
BC	0.00201667	1	0.00201667	8.16	0.0127
RESIDUAL	0.00345833	14	0.000247024		
TOTAL (CORRECTED)	0.313983	23			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

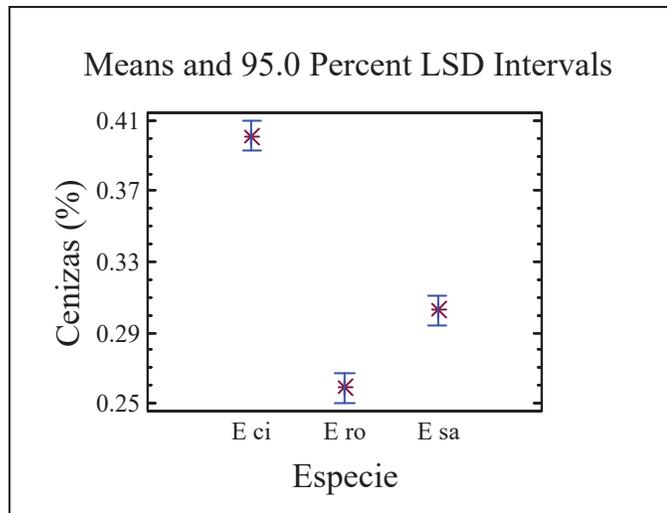


Figura 22. Efecto de la especie sobre el contenido de cenizas

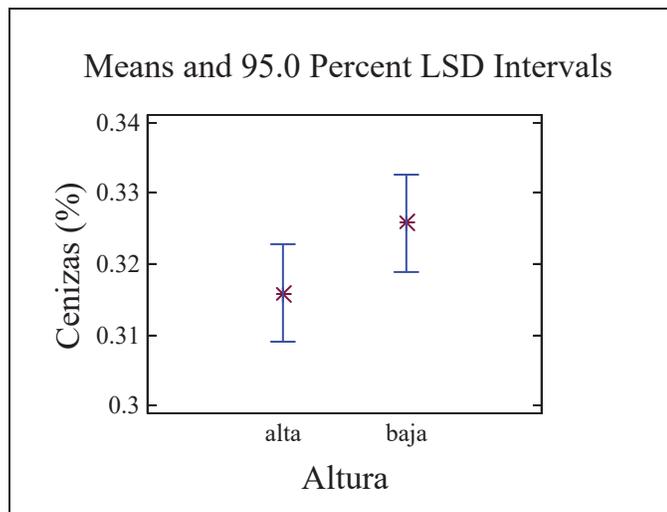


Figura 23. Efecto de la altura sobre el contenido de cenizas

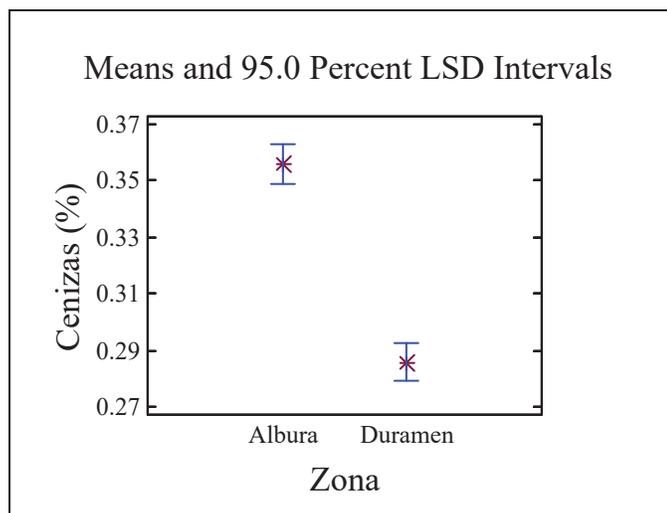


Figura 24. Efecto de la zona sobre el contenido de cenizas

Tabla 9. Prueba del rango múltiple para cenizas por especie

Multiple Range Tests for Cenizas by Especie			

Method: 95.0 percent LSD			
Especie	Count	LS Mean	Homogeneous Groups

E ro	8	0.25875	X
E sa	8	0.3025	X
E ci	8	0.40125	X

Contrast		Difference	+/- Limits

E ci - E ro		*0.1425	0.0168548
E ci - E sa		*0.09875	0.0168548
E ro - E sa		*-0.04375	0.0168548

* denotes a statistically significant difference.			

Tabla 10. Prueba del rango múltiple para cenizas por altura

Multiple Range Tests for Cenizas by Altura			

Method: 95.0 percent LSD			
Altura	Count	LS Mean	Homogeneous Groups

alta	12	0.315833	X
baja	12	0.325833	X

Contrast		Difference	+/- Limits

alta - baja		-0.01	0.0137619

* denotes a statistically significant difference.			

Tabla 11. Prueba del rango múltiple para cenizas por zona

Multiple Range Tests for Cenizas by Zona			

Method: 95.0 percent LSD			
Zona	Count	LS Mean	Homogeneous Groups

Duramen	12	0.285833	X
Albura	12	0.355833	X

Contrast		Difference	+/- Limits

Albura - Duramen		*0.07	0.0137619

* denotes a statistically significant difference.			

7.3 Extraíbles

A continuación se presentan los valores promedio obtenidos a las dos alturas, de las extracciones en forma secuencial con los solventes de polaridad ascendente, mostrados en la tabla 12 para la albura y en la tabla 13 para el duramen. Así como también se representan de manera gráfica, en las figuras 25 y 26 respectivamente.

Posteriormente se presenta el análisis estadístico de los valores mencionados en las tablas para la suma de extractos.

Tabla 12. Valores de las extracciones con los diferentes solventes para la albura en %

Albura						
Especie	Parte	Ciclohexano	Acetona	Metanol	H2O caliente	Suma de extractos
<i>E. ci</i>	Baja	0.26	2.05	1.71	0.84	4.85
	Alta	0.19	1.53	1.18	0.78	3.67
<i>E. ro</i>	Baja	0.46	1.52	1.28	0.66	3.92
	Alta	0.26	1.26	1.14	0.67	3.33
<i>E. sa</i>	Baja	0.15	1.24	1.38	0.89	3.65
	Alta	0.13	0.78	1.19	0.74	2.84

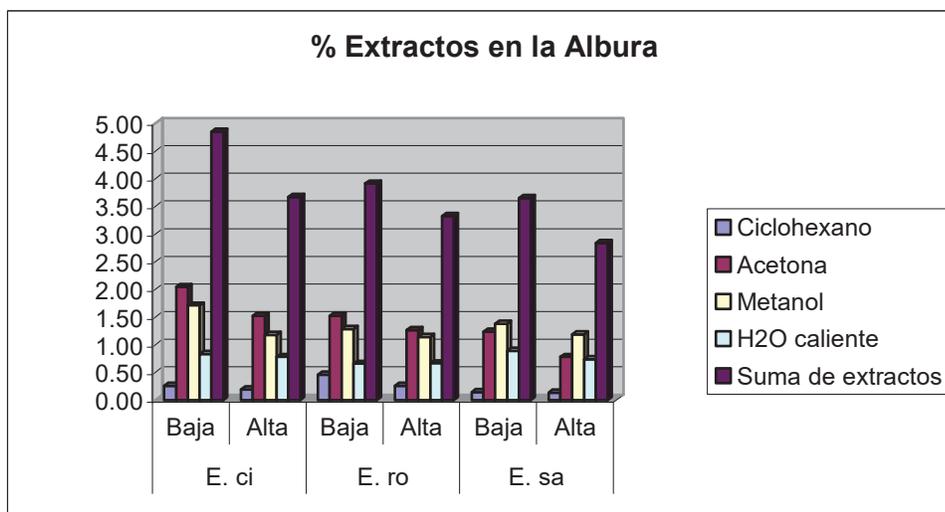
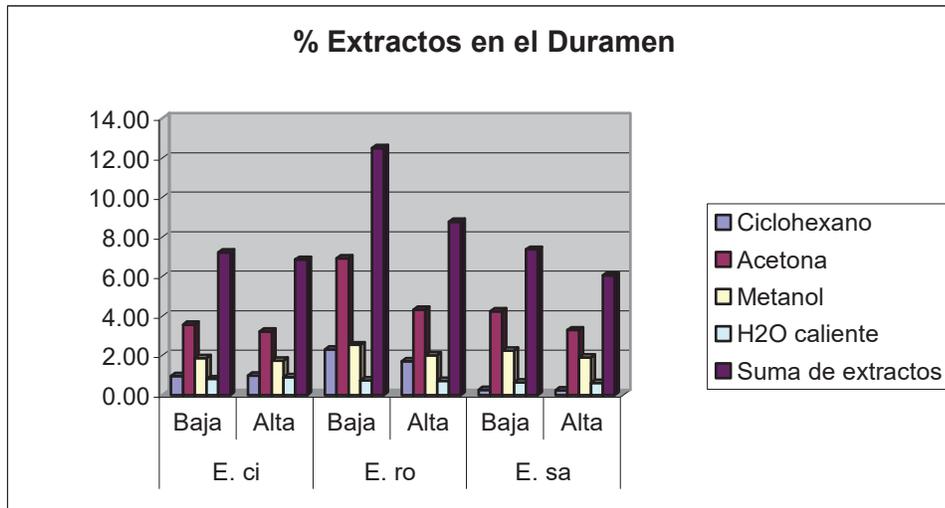


Figura 25. Gráfica de los valores obtenidos en las extracciones para la albura

Tabla 13. Valores de las extracciones con los diferentes solventes para el duramen en %

Duramen						
Especie	Parte	Ciclohexano	Acetona	Metanol	H2O caliente	Suma de extractos
<i>E. ci</i>	Baja	0.96	3.56	1.88	0.82	7.21
	Alta	1.00	3.21	1.73	0.92	6.85
<i>E. ro</i>	Baja	2.31	6.92	2.53	0.75	12.50
	Alta	1.72	4.33	2.02	0.72	8.78
<i>E. sa</i>	Baja	0.27	4.24	2.25	0.64	7.37
	Alta	0.24	3.29	1.91	0.62	6.05

**Figura 26.** Gráfica de los valores obtenidos en las extracciones para el duramen

En la tabla 14 se presenta el análisis de varianza (Anova) referente al contenido de extraíbles donde se observa que el nivel de significancia calculado con los resultados obtenidos (p-Value) es menor para cada factor estudiado al nivel de significancia fijado para el análisis estadístico (0.05), por lo que la hipótesis formulada se rechaza, lo que significa que dichos factores si tienen efecto estadístico significativo en la variable de respuesta, que en este caso es el contenido de extraíbles; el mismo caso se observa para la interacción especie-zona. Para llevar a cabo la comparación de medias del efecto significativo de los factores, se aplicó el método de la mínima diferencia significativa (LSD) (Montgomery 1991), mostrando los resultados en las figuras 27, 28 y 29, así como en las tablas 15, 16 y 17.

Tabla 14. Análisis de varianza (Anova) para el contenido de extraíbles

Analysis of Variance for Extraibles - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:Especie	19.4429	2	9.72145	30.56	0.0000
B:Altura	10.6134	1	10.6134	33.36	0.0000
C:Zona	117.042	1	117.042	367.93	0.0000
INTERACTIONS					
AB	2.14278	2	1.07139	3.37	0.0639
AC	20.7795	2	10.3898	32.66	0.0000
BC	1.31602	1	1.31602	4.14	0.0614
RESIDUAL	4.45351	14	0.318108		
TOTAL (CORRECTED)	175.79	23			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

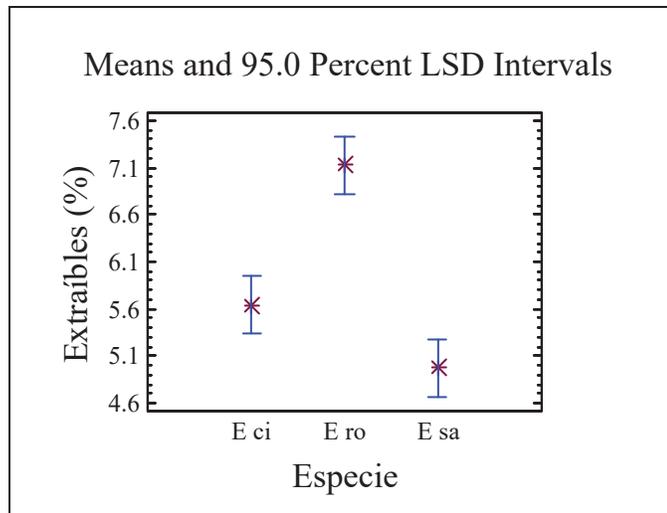


Figura 27. Efecto de la especie sobre el contenido de extraíbles

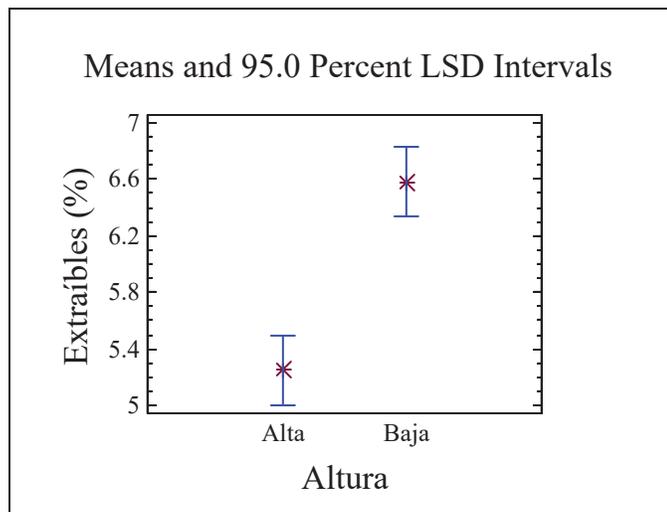


Figura 28. Efecto de la altura sobre el contenido de extraíbles

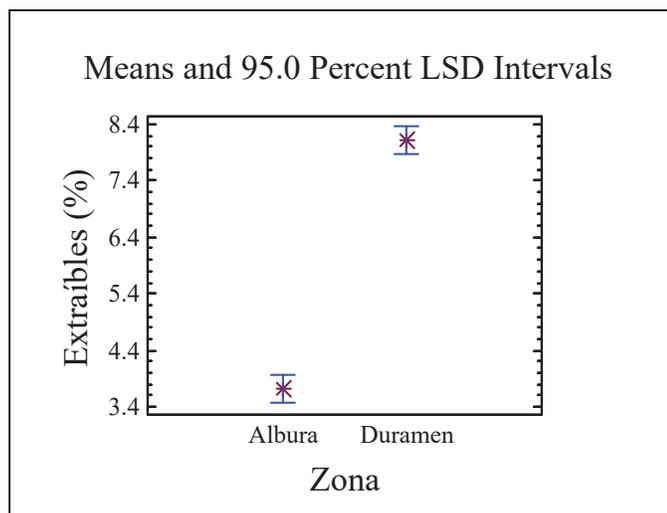


Figura 29. Efecto de la zona sobre el contenido de extraíbles

Tabla 15. Prueba del rango múltiple para extraíbles por especie

Multiple Range Tests for Extraíbles by Especie			

Method: 95.0 percent LSD			
Especie	Count	LS Mean	Homogeneous Groups

E sa	8	4.975	X
E ci	8	5.64375	X
E ro	8	7.12875	X

Contrast		Difference	+/- Limits

E ci - E ro		*-1.485	0.604842
E ci - E sa		*0.66875	0.604842
E ro - E sa		*2.15375	0.604842

* denotes a statistically significant difference.			

Tabla 16. Prueba del rango múltiple para extraíbles por altura

Multiple Range Tests for Extraíbles by Altura			

Method: 95.0 percent LSD			
Altura	Count	LS Mean	Homogeneous Groups

Alta	12	5.25083	X
Baja	12	6.58083	X

Contrast		Difference	+/- Limits

Alta - Baja		*-1.33	0.493852

* denotes a statistically significant difference.			

Tabla 17. Prueba del rango múltiple para extraíbles por zona

Multiple Range Tests for Extraíbles by Zona			

Method: 95.0 percent LSD			
Zona	Count	LS Mean	Homogeneous Groups

Albura	12	3.7075	X
Duramen	12	8.12417	X

Contrast		Difference	+/- Limits

Albura - Duramen		*-4.41667	0.493852

* denotes a statistically significant difference.			

7.4 Lignina

Concerniente al contenido de Lignina, el análisis de varianza (Anova) presentado en la tabla 18 muestra que el nivel de significancia calculado con los resultados obtenidos (p-Value) es menor para cada factor estudiado al nivel de significancia fijado para el análisis estadístico (0.05), por lo que la hipótesis formulada se rechaza, indicando que dichos factores si tienen efecto estadístico significativo en la variable de respuesta, que en este caso es el contenido de Lignina; el mismo caso se observa para la interacción especie-zona. Para llevar a cabo la comparación de medias del efecto significativo de los factores, se aplicó el método de la mínima diferencia significativa (LSD) (Montgomery 1991), mostrando los resultados en las figuras 30, 31 y 32, así como en las tablas 19, 20 y 21.

Tabla 18. Análisis de varianza (Anova) para el contenido de lignina

Analysis of Variance for Lignina - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:Especie	31.4043	2	15.7022	86.67	0.0000
B:Altura	6.93375	1	6.93375	38.27	0.0000
C:Zona	3.48082	1	3.48082	19.21	0.0006
INTERACTIONS					
AB	0.057775	2	0.0288875	0.16	0.8541
AC	1.62281	2	0.811404	4.48	0.0314
BC	0.375	1	0.375	2.07	0.1722
RESIDUAL	2.53648	14	0.181177		
TOTAL (CORRECTED)	46.4109	23			
All F-ratios are based on the residual mean square error.					

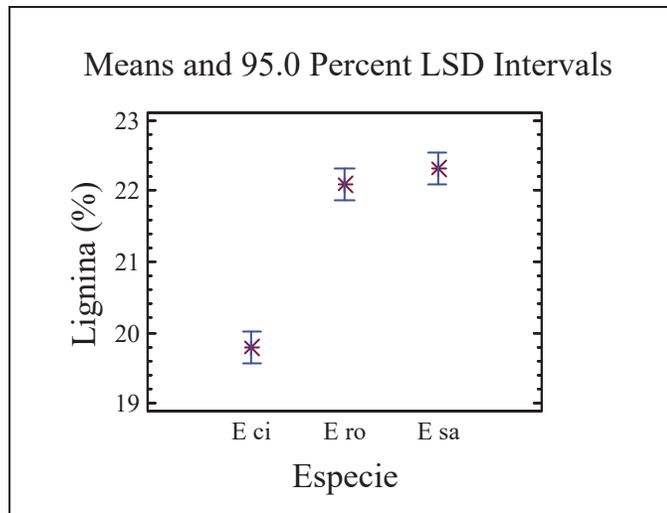


Figura 30. Efecto de la especie sobre el contenido de lignina

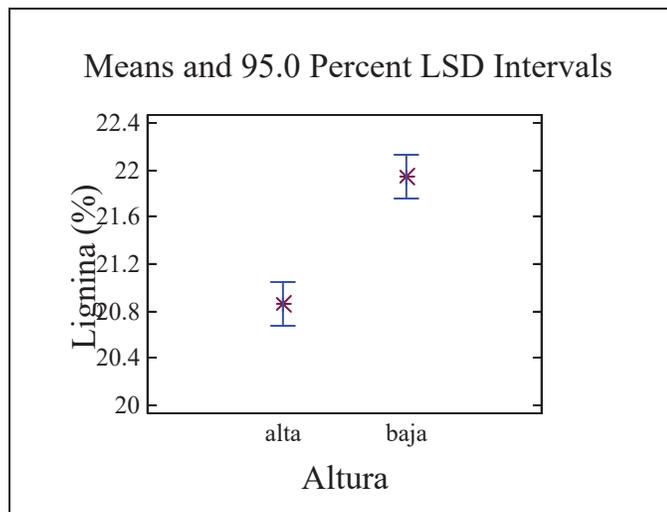


Figura 31. Efecto de la altura sobre el contenido de lignina

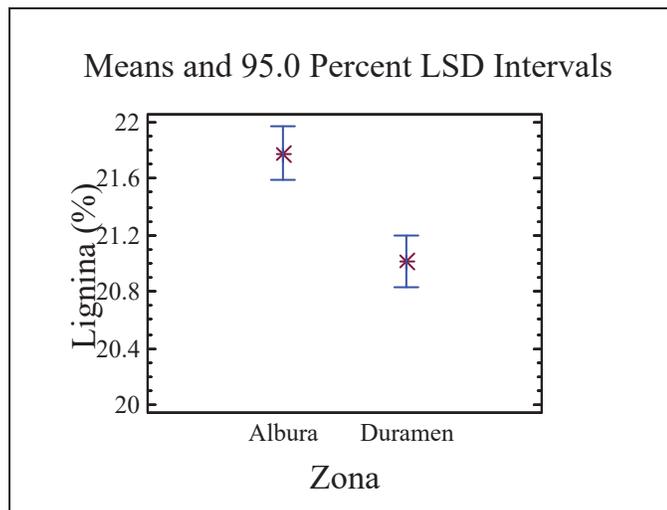


Figura 32. Efecto de la zona sobre el contenido de lignina

Tabla 19. Prueba del rango múltiple para lignina por especie

Multiple Range Tests for Lignina by Especie			

Method: 95.0 percent LSD			
Especie	Count	LS Mean	Homogeneous Groups

E ci	8	19.7862	X
E ro	8	22.0875	X
E sa	8	22.3212	X

Contrast		Difference	+/- Limits

E ci - E ro		*-2.30125	0.456464
E ci - E sa		*-2.535	0.456464
E ro - E sa		-0.23375	0.456464

* denotes a statistically significant difference.			

Tabla 20. Prueba del rango múltiple para lignina por altura

Multiple Range Tests for Lignina by Altura			

Method: 95.0 percent LSD			
Altura	Count	LS Mean	Homogeneous Groups

alta	12	20.8608	X
baja	12	21.9358	X

Contrast		Difference	+/- Limits

alta - baja		*-1.075	0.372701

* denotes a statistically significant difference.			

Tabla 21. Prueba del rango múltiple para lignina por zona

Multiple Range Tests for Lignina by Zona			

Method: 95.0 percent LSD			
Zona	Count	LS Mean	Homogeneous Groups

Duramen	12	21.0175	X
Albura	12	21.7792	X

Contrast		Difference	+/- Limits

Albura - Duramen		*0.761667	0.372701

* denotes a statistically significant difference.			

7.5 Holocelulosa

Observando el análisis de varianza (Anova) mostrado en la tabla 22 para el contenido de holocelulosa se ve que el nivel de significancia calculado con los resultados obtenidos (p-Value) para los factores especie y altura, así como sus 3 interacciones es menor al nivel de significancia fijado para el análisis estadístico (0.05), rechazando la hipótesis formulada, lo cual significa que también dichos factores si tienen efecto estadístico significativo en la variable de respuesta, tratándose del contenido de holocelulosa. Para llevar a cabo la comparación de medias del efecto significativo de los factores, se aplicó el método de la mínima diferencia significativa (LSD) (Montgomery 1991), mostrando los resultados en las figuras 33, 34 y 35, así como en las tablas 23, 24 y 25.

Tabla 22. Análisis de varianza (Anova) para el contenido de holocelulosa

Analysis of Variance for Holocelulosa - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:Especie	360.996	2	180.498	4.04	0.0411
B:Altura	321.714	1	321.714	7.21	0.0178
C:Zona	33.0645	1	33.0645	0.74	0.4040
INTERACTIONS					
AB	458.158	2	229.079	5.13	0.0213
AC	3249.36	2	1624.68	36.39	0.0000
BC	237.699	1	237.699	5.32	0.0368
RESIDUAL	625.103	14	44.6502		
TOTAL (CORRECTED)	5286.1	23			
All F-ratios are based on the residual mean square error.					

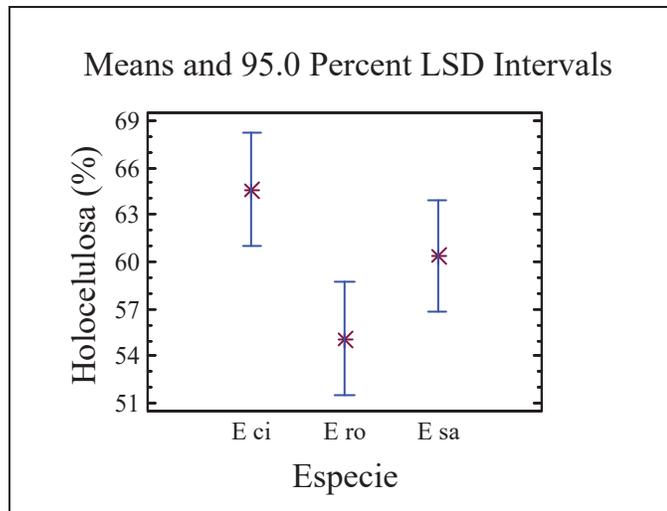


Figura 33. Efecto de la especie sobre el contenido de holocelulosa

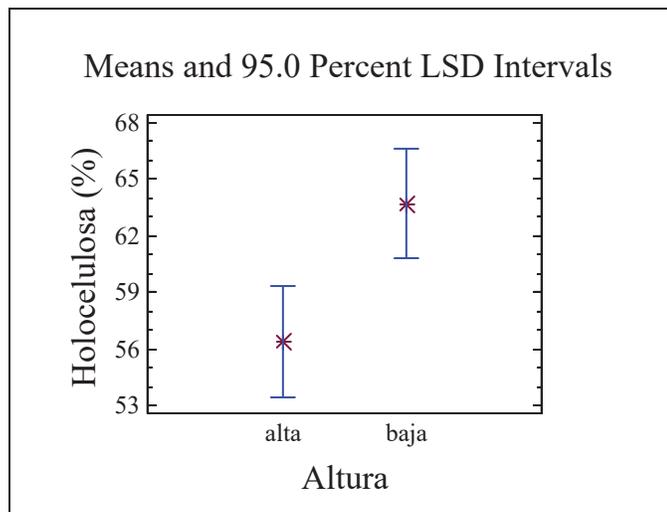


Figura 34. Efecto de la altura sobre el contenido de holocelulosa

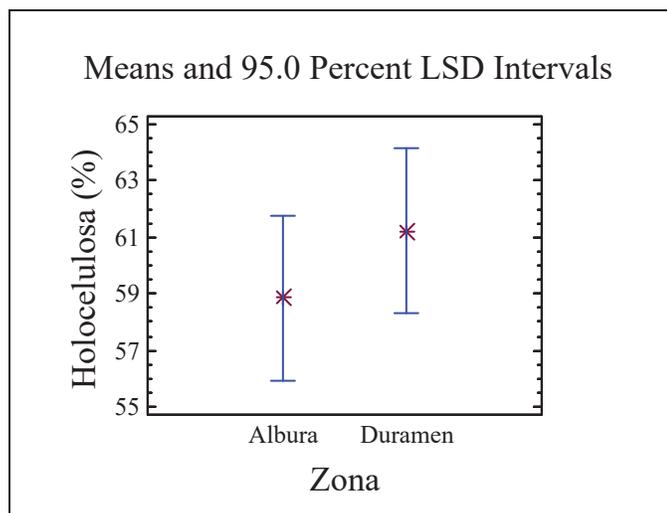


Figura 35. Efecto de la zona sobre el contenido de holocelulosa

Tabla 23. Prueba del rango múltiple para holocelulosa por especie

Multiple Range Tests for Holocelulosa by Especie			

Method: 95.0 percent LSD			
Especie	Count	LS Mean	Homogeneous Groups

E ro	8	55.1088	X
E sa	8	60.3975	XX
E ci	8	64.5875	X

Contrast		Difference	+/- Limits

E ci - E ro		*9.47875	7.16583
E ci - E sa		4.19	7.16583
E ro - E sa		-5.28875	7.16583

* denotes a statistically significant difference.			

Tabla 24. Prueba del rango múltiple para holocelulosa por altura

Multiple Range Tests for Holocelulosa by Altura			

Method: 95.0 percent LSD			
Altura	Count	LS Mean	Homogeneous Groups

alta	12	56.37	X
baja	12	63.6925	X

Contrast		Difference	+/- Limits

alta - baja		*-7.3225	5.85088

* denotes a statistically significant difference.			

Tabla 25. Prueba del rango múltiple para holocelulosa por zona

Multiple Range Tests for Holocelulosa by Zona			

Method: 95.0 percent LSD			
Zona	Count	LS Mean	Homogeneous Groups

Albura	12	58.8575	X
Duramen	12	61.205	X

Contrast		Difference	+/- Limits

Albura - Duramen		-2.3475	5.85088

* denotes a statistically significant difference.			

7.6 Cuantificación de Azúcares

A partir de los cromatogramas obtenidos una vez realizadas las inyecciones en el equipo de cromatografía líquida de alta presión (HPLC), se obtuvieron los siguientes resultados de la madera de los eucaliptos estudiados, los cuales se muestran en las Tablas 26 y 27 para albura y duramen, así como en las figuras 36 y 37 respectivamente:

Tabla 26. Porcentaje de los azúcares en la albura por especie, a dos alturas

% de azúcares en la Albura						
Especie	Parte	Arabinosa	Galactosa	Glucosa	Xilosa	Manosa
E. ci	Baja	0.70	1.73	3.83	25.28	0.19
	Alta	0.17	0.26	0.30	3.60	0.00
E. ro	Baja	0.14	1.23	4.65	2.31	0.01
	Alta	0.20	1.32	4.06	1.80	0.06
E. sa	Baja	2.37	10.64	30.05	21.44	1.38
	Alta	0.70	6.90	35.34	26.14	1.55

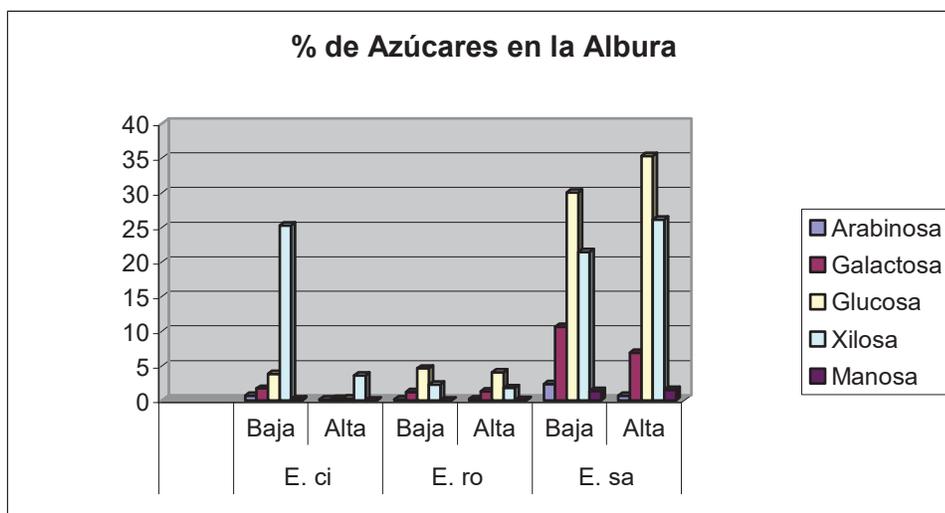
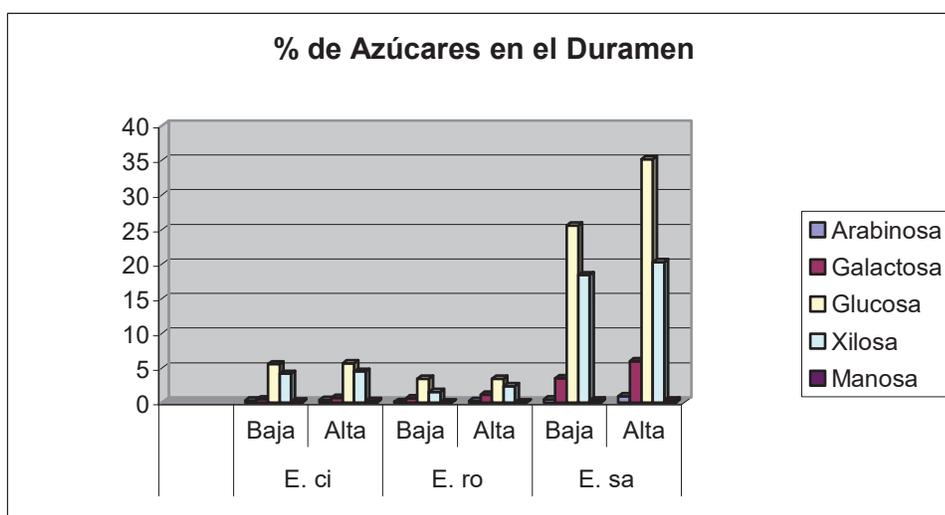


Figura 36. Gráfica del % de azúcares en la albura por especie, a dos alturas

Tabla 27. Porcentaje de los azúcares en el duramen por especie, a dos alturas

% de azúcares en el Duramen						
Especie	Parte	Arabinosa	Galactosa	Glucosa	Xilosa	Manosa
E. ci	Baja	0.32	0.49	5.55	4.18	0.16
	Alta	0.39	0.70	5.65	4.49	0.21
E. ro	Baja	0.13	0.62	3.43	1.53	0.03
	Alta	0.21	1.17	3.44	2.36	0.05
E. sa	Baja	0.48	3.54	25.61	18.42	0.34
	Alta	0.91	5.98	35.18	20.32	0.32

**Figura 37.** Gráfica del % de azúcares en el duramen por especie, a dos alturas

Para ejemplificar un perfil de análisis de los azúcares, en la figura 38 se muestra un cromatógrama, donde por el tiempo de retención de los picos se identifican los azúcares y por la superficie de cada pico cuantificarlos.

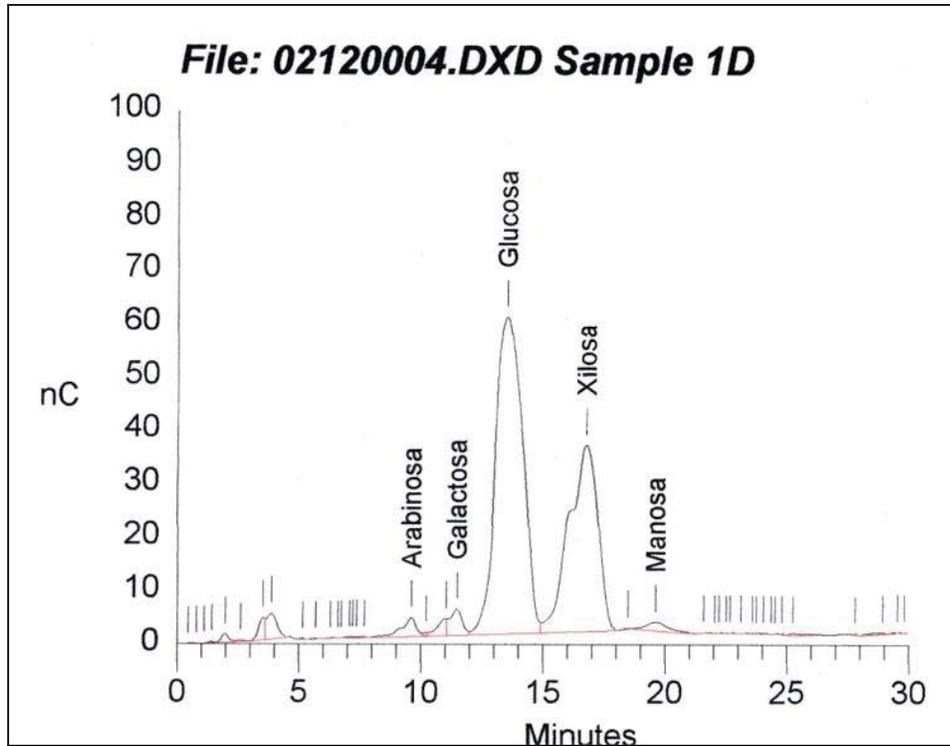


Figura 38. Ejemplo de un perfil cromatográfico para la identificación y cuantificación de azúcares

7.7 Poder Calorífico

En la tabla 28 se presentan los valores de poder calorífico en las muestras de albura y duramen determinado en harina sin extraer y harina libre de extractos.

Tabla 28. Resultados de poder calorífico para albura y duramen

Madera sin extraer				
Especie	Albura		Duramen	
<i>E. citriodora</i>	3790.68 cal/g	15.870 MJ/Kg	3949.51 cal/g	16.535 MJ/Kg
<i>E. robusta</i>	4112.91 cal/g	17.219 MJ/Kg	3679.33 cal/g	15.404 MJ/Kg
<i>E. saligna</i>	4118.43 cal/g	17.243 MJ/Kg	3922.84 cal/g	16.424 MJ/Kg
Madera libre de extractos				
<i>E. citriodora</i>	3897.79 cal/g	16.319 MJ/Kg	3704.44 cal/g	15.509 MJ/Kg
<i>E. robusta</i>	3921.45 cal/g	16.418 MJ/Kg	3668.43 cal/g	15.359 MJ/Kg
<i>E. saligna</i>	3935.33 cal/g	16.476 MJ/Kg	3863.79 cal/g	16.176 MJ/Kg

8. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Análisis químico

pH

Llevadas a cabo las mediciones de pH los valores en la parte baja de las tres especies estudiadas fueron de 4.17 para *E. citriodora*, 4.66 en *E. robusta* y 4.61 en *E. saligna* para la albura, y en el duramen 3.77 para *E. citriodora*, 3.04 en *E. robusta* y 3.18 en *E. saligna*. Para la parte alta se registraron valores de 4.83 en *E. citriodora*, 4.69 en *E. robusta*, y 4.72 para *E. saligna* en albura y en duramen 3.81 para *E. citriodora*, 3.22 en *E. robusta* y 3.43 en *E. saligna* y se presentan en las tablas 2 y 3 en el capítulo de resultados.

Analizando estadísticamente los datos, en promedio el valor de pH más ácido correspondió a la especie de *E. robusta*, seguida de *E. saligna* y el menos ácido fue para *E. citriodora*, encontrando diferencias estadísticas (Tabla 4) entre la primer especie y la última, no así entre las dos primeras y las dos últimas (Fig. 19, Tabla 5).

El pH resultó ser más ácido en las muestras tomadas de la parte baja, es decir, de la primer rodaja, en comparación con las muestras de la parte de arriba (Fig. 20, Tabla 6), encontrando diferencias estadísticas (Tabla 4). Por otra parte, el duramen de las especies estudiadas fue más ácido que la albura (Fig. 21, Tabla 7), encontrando también diferencias estadísticas (Tabla 4).

Es conocido que el valor del pH está influenciado por la cantidad y tipo de sustancias extraíbles presentes en una muestra de madera, concretamente por la presencia de ácidos libres y grupos ácidos, entre otros, siendo en general más ácido el duramen que la albura (Fengel, Wegener 1983), lo que se corrobora con los resultados para las especies aquí estudiadas.

Datos bibliográficos sobre el pH en muestras de madera de eucaliptos, se reportan por Pedraza (2006) los siguientes valores de pH en la corteza de las especies de eucalipto: *E. camaldulensis* (4.82), *E. citriodora* (4.68), *E. robusta* (3.39) y *E. saligna* (5.0). A excepción de *E. robusta* y *E. citriodora*, el pH de la corteza de *E. saligna* resultó ser menos ácido que la madera, ya sea la albura o el duramen.

Sin embargo el pH de la albura en la parte alta del fuste de las tres especies fue menos ácido que el pH de la corteza de *E. citriodora*, solamente el pH de la corteza de *E. citriodora* fue menos ácido que la albura de la parte baja de la misma

especie, ya que también la albura de la parte baja de *E. robusta* y *E. saligna* fueron menos ácidas.

En el caso de los datos reportados para el duramen de las tres especies *E. citriodora* en parte baja y alta resultó menos ácido, así como el duramen de la parte alta de *E. saligna* en comparación con el valor reportado para corteza de *E. robusta*, el duramen de *E. robusta* a las dos alturas del fuste fue mas ácido que la corteza de la misma especie al igual que el duramen de *E. saligna* en la parte baja.

Comparando los datos del presente trabajo con valores reportados en madera de otras especies, podríamos decir que el pH en el duramen de las tres especies estudiadas entra en el rango reportado para *Quercus borealis* (3.4 a 3.8) (Wagenfür, Scheiber 1974), y son mas bajos que *Pterocarpus soyauxii* (3.7) (Fengel, Wegener 1983); lo que nos indica mayor acidez, sólo el duramen de la parte alta de *E. citriodora* resulta más alto.

Valores cercanos a los encontrados en las alburas de los tres eucaliptos se encuentran los siguientes, 4.6 en duramen de *Pinus pseudostrobus* y duramen de *Quercus laurina* (Rutiaga 2001), 4.7 en *Lophira procera* y *Shorea sp.*, y 4.8 en *Betula verrucosa* (Fengel, Wegener 1983).

Inorgánicos

Los valores en relación al contenidos de cenizas reportados en las tablas 2 y 3, en el capítulo de resultados fueron para la parte baja del árbol de 0.33 en *E. citriodora*, 0.28 para *E. robusta*, y 0.45 para *E. saligna* en albura, en duramen se obtuvieron valores de 0.50 en *E. citriodora*, 0.26 en *E. robusta* y 0.15 para *E. saligna*. Para la parte alta del árbol en albura se encontraron valores de 0.35 en *E. citriodora*, 0.27 en *E. robusta*, y 0.47 en *E. saligna*, el duramen reporto 0.43 para *E. citriodora*, 0.23 para *E. robusta* y 0.16 en *E. saligna*.

Respecto al contenido de cenizas, observando el análisis estadístico presentado encontramos diferencias estadísticas significativas (Tabla 8) con respecto a las especies teniendo mayor porcentaje de cenizas en *E. citriodora*, seguida de *E. saligna* y por ultimo *E. robusta* con el menor porcentaje (Fig. 22, Tabla 9).

Por otra parte el contenido de cenizas no presentó diferencia alguna con respecto a la altura de la cual se tomó la muestra (Tablas 8 y 10, Fig. 23). Para el caso de la zona de estudio como es la albura y el duramen el porcentaje mayor se encuentra en la albura teniendo diferencia significativa con el duramen (Tablas 8 y 11, Fig. 24). Lo que corrobora Hillis (1984), afirmando que el duramen tiene la concentración más baja de nutrientes inorgánicos en el árbol.

En datos bibliográficos para especies de Eucalipto, Pedraza (2006) reporta valores de contenido de cenizas en corteza para *E. camaldulensis* (4.9%), *E. citriodora* (4.34%), *E. robusta* (1.18%), y *E. saligna* (3.82%), dichos valores están muy por encima de los reportados en el presente estudio para la madera dividida en albura y duramen, como lo indica Fengel, Wegener (1983) afirmando que existe mayor proporción de sustancias inorgánicas en la corteza que en la madera.

Valores aproximados de contenido de cenizas en madera de Eucaliptos se mencionan a continuación: *E. cloeziana* (0.3), *E. grandis* (0.3), *E. kirtoniana* (0.1), *E. urophylla* (0.4), y *E. saligna* (0.2) (Rowell 1984), los valores reportados en este trabajo para *E. saligna* muestran que la albura esta por encima y el duramen ligeramente por debajo del valor reportado por (Rowell 1984) para la misma especie. Pereira, *et al.* (2000), estudiando varios eucaliptos de 10.5 años, reportan en *E. citriodora* 1.6% de cenizas, y en *E. saligna* 0.5% que en relación con los porcentajes para estas mismas especies ya sea en albura o en duramen de este trabajo resultan más altos, siendo los valores en albura de *E. saligna* ligeramente cercanos y los de *E. citriodora* cinco veces más bajos.

Akira *et al.* (2003) reportan valores de cenizas para Eucaliptos como: *E. tereticornis* (0.09), *E. punctata* (0.08), *E. siderophloia* (0.10), *E. melanophloia* (0.24), *E. resinifera* (0.04), *E. nesophylla* (0.08), *E. grandis* (0.07), *E. paniculata* (1.0), *E. robusta* (0.21), *E. dunii* (0.74), *E. paeotricha* (0.11), *E. saligna* (0.09), y *E. urophylla* (0.16). Los valores reportados para *E. robusta* en albura y duramen son más altos, en este trabajo, que el reportado por Akira *et al.* (2003), pero se pueden considerar ligeramente iguales.

Es conocido que la cantidad de sustancias inorgánicas en la madera depende del lugar de crecimiento del individuo, de la época de corte y de la posición de la muestra dentro del fuste (Trendelenberg 1939), así como también las condiciones del suelo y la edad influyen en los contenidos de sustancias minerales según Carballo (1990), por lo que a ciencia cierta, no se puede hacer un comparativo solamente con ciertas reservas.

Extraíbles

Después de la extracción sucesiva con solventes orgánicos y agua caliente, se obtuvieron los valores de extraíbles en cada solvente y la suma total de extraíbles, cuyos valores se presentan en las tablas 12 y 13, y también se muestran gráficamente en las figuras 25 y 26.

Los resultados en por ciento fueron, para la parte baja en la albura de 4.85 en *E. citriodora*, 3.92 en *E. robusta* y 3.65 para *E. saligna*, en duramen se obtuvo 7.21 en *E. citriodora*, 12.50 en *E. robusta* y 7.37 para *E. saligna*. En la parte alta para

albura fue de 3.67 en *E. citriodora*, 3.33 en *E. robusta* y 2.84 para *E. saligna*, y en duramen 6.85 en *E. citriodora*, 8.78 en *E. robusta* y 6.05 para *E. saligna*.

En el caso de la suma de extraíbles, la estadística nos muestra que en relación con las especies en estudio si existe diferencia significativa entre las tres especies (Tabla 14) teniendo mayor cantidad de extraíbles en *E. robusta* seguido de *E. citriodora* y por ultimo *E. saligna* con la menor proporción (Fig. 27, Tabla 15).

El contenido de sustancias extraíbles resultó ser más alto en la parte baja del árbol en relación con la parte alta mostrando diferencia significativa muy marcada entre ambas (Tablas 14 y 16, Fig. 28). De igual forma sucede para el caso entre la albura y el duramen siendo este último el que contiene mayor cantidad de extraíbles teniendo también diferencia muy marcada entre las zonas de estudio (Tablas 14 y 17, Fig. 29). Siendo conocido que es típico encontrar mayor cantidad de extraíbles en el duramen que en la albura (Hillis 1987, Fengel, Wegener 1983).

Utilizando extracción sucesiva con solventes de polaridad ascendente, como fue el caso de este estudio, se puede lograr una separación de las sustancias solubles de la madera en clases o tipos de sustancias (Hillis 1971, Fengel, Wegener 1983, Weissmann *et al.* 1989), en el presente trabajo se tuvo una mayor solubilidad con acetona, seguido por metanol y agua caliente, y las menores proporciones correspondieron a ciclohexano, el cual es un solvente no polar.

Solamente en albura de *E. saligna* la solubilidad en metanol fue ligeramente mayor a la de acetona y en duramen de *E. citriodora* y *E. robusta* la fracción referente a ciclohexano fue más alta que la de agua caliente.

Sin embargo queda de manifiesto que para lograr una separación de sustancias extraíbles, cuando el objetivo posterior sea su identificación y caracterización, y aún cuando se desea obtener material libre de extractos, es mejor aplicar una secuencia de solventes de polaridad ascendente (Téllez 2004).

Por otra parte, hacer comparaciones con otros trabajos no resulta sencillo, pues la toma de muestras no es estandarizada, y generalmente se extrae variando el uso de solventes y métodos.

También se debe valorar el hecho de que en el rendimiento de extraíbles influyen otros factores como son ambientales y genéticos, la edad del árbol, el clima, la cantidad de agua suministrada, los nutrientes disponibles y la época de corta (Hillis 1971, Shiraishi *et al.* 1991). A continuación se citan algunos trabajos hechos con especies de Eucalipto.

Gutmann *et al.* (1971) encuentran 4.2% de extraíbles en *E. globulus*, Bamber, Curtin (1974) reportan para *E. pelularis* una variación en el contenido de extraíbles de 7.4

a 8.4% en el duramen, hasta 2.9% en la albura. Tischler (1976), citado por Hillis (1984), reportan sustancias solubles en agua caliente para el exterior del duramen en el *E. camaldulensis* de 18-20 años mayores de 14.3 % y en el interior del duramen 12.1%, para la albura se obtuvo el valor de 7.4%.

Hillis (1987) reporta valores de extracto en agua caliente para duramen de *E. creba* (6.8 a 20.2%), *E. delegantensis* (2.4 a 6.5%), *E. obliqua* (7.9 a 26.6%), *E. regnans* (4.8 a 15.3%) y *E. sieberi* (2.6 a 15.5%), el mismo obtiene valores de extracto en etanol para duramen de las mismas especies siendo para *E. creba* (5 a 18.6%), *E. delegantensis* (1.6 a 16.55%), *E. obliqua* (10.1 a 29.1%), *E. regnans* (1.3 a 16.3%) y *E. sieberi* (4.7 a 17.7%).

Mansilla *et al.* (1991) citado por Barahona (2005), reportan para árboles de *E. globulus* de entre 10 y 25 años un contenido de extraíbles de 5.1%.

Paz (1994), para madera de *E. globulus* de 8 años encontró 1.4% de extraíbles en etanol-benceno. Paredo (1999), para la misma especie utilizando solamente etanol-tolueno obtuvo 0.44 y 0.58% en árboles de 8 y 10 años respectivamente en sitios diferentes. Paz, Pérez (1999), para *E. globulus* de 8 años encuentran 1.4% de extraíbles en alcohol, 1% en árboles de 14 años y 1.3% en árboles de 19 años.

Akira *et al.* (2003), en su estudio reportan contenidos de extraíbles para *E. tereticornis* (10.73%), *E. punctata* (8.06%), *E. siderophloia* (12.46%), *E. melanophloia* (9.54%), *E. resinifera* (11.19%), *E. nesophylla* (8.34%), *E. grandis* (4.66%), *E. paniculata* (6.07%), *E. robusta* (11.28%), *E. dunii* (6.85%), *E. paeotricha* (10.4%), *E. saligna* (9.43%), y *E. urophylla* (9.15%).

Barahona (2005), utilizando cinco árboles de *E. globulus* a cuatro alturas estudio la variación de la composición química en albura y duramen encontrando para albura valores de 1.15% a 0.90m, 1.44% a 8.9m, 1.67% a 16.3m, y 2.27% a 21.2m, y en duramen 3.88% a 0.90m y 2.84% a 8.9m.

Da Silva *et al.* (2005), encontraron para *E. citriodora* 13.9 % de extraíbles en metanol, y Reis (1973) menciona que el contenido de extraíbles en metanol es de 11.1% en árboles de 11 años. Por último Pedraza (2006), en corteza obtuvo valores de contenido de extraíbles para *E. camaldulensis* 20.1%, *E. citriodora* 18.9%, *E. robusta* 17.1%, y 21.3% en *E. saligna*.

Aún cuando ya se mencionó anteriormente que un comparativo resulta difícil, los datos reportados de extracto en agua caliente del duramen (Tabla 13) para las tres especies estudiadas son muy bajos en relación a los que reporta Hillis (1987) y los extractos solubles en metanol del duramen (Tabla 13) entran en el rango de *E. delegantensis* y *E. regnans* con etanol, teniendo en cuenta que se trata de otro solvente.

Hablando de las cantidades de suma de extractos podríamos decir que algunos valores para duramen en este trabajo son ligeramente similares a los mencionados por Akira *et al.* (2003), en algunos Eucaliptos, otros resultan más altos o bajos según sea el caso en contenido de extraíbles comparándolos con los obtenidos en este trabajo, señalando que estos valores pueden referirse a extracciones en muestras de árboles adultos, y con solventes diferentes a los utilizados en este estudio, por lo que se considera guardar cierta cautela al hacer comparaciones.

Mencionando a los otros autores citados anteriormente no se pueden comparar los datos que obtuvieron entre sí, ni con los reportados para las especies de este trabajo, solamente decir que los valores reportados por Barahona (2005) a diversas alturas para *E. globulus* son inferiores a los encontrados en *E. citriodora*, *E. robusta* y *E. saligna*, y los valores obtenidos por Pedraza (2006) para las cortezas de las mismas especies resultan ser muy superiores a los de la madera dejando de manifiesto que existe mayor cantidad de extractos en corteza como lo indica Fengel, Wegener (1983).

Lignina

De acuerdo con los datos presentados en las tablas 2 y 3 de el capítulo de resultados fueron en albura de la parte baja del fuste de 21.18 para *E. citriodora*, 23.12 en *E. robusta* y 23.03 en *E. saligna*, y en la parte alta fueron de 19.87 en *E. citriodora*, 21.61 en *E. robusta* y 21.88 para *E. saligna*. En cuanto al duramen, en la parte baja se obtuvo 19.52 para *E. citriodora*, 22.22 en *E. robusta* y 22.56 en *E. saligna*, y para la parte alta 18.58 para *E. citriodora*, 21.41 en *E. robusta*, y 21.83 en *E. saligna*.

El porcentaje de lignina presente en la madera estadísticamente fue mayor en *E. saligna* seguida de *E. robusta* y por último *E. citriodora* con el menor porcentaje, habiendo diferencia significativa entre esta última y las dos primeras (Tablas 18 y 19, Fig. 30).

En cuanto a las dos alturas la parte baja es en donde se encuentra el mayor porcentaje de lignina, existiendo diferencia estadística significativa con la parte alta (Tablas 18 y 20, Fig. 31). También hubo diferencia estadística entre zonas con un porcentaje de lignina más alto para la albura que para el duramen (Tablas 18 y 21, Fig. 32).

En trabajos bibliográficos que reportan valores de lignina en madera de Eucalipto, Hillis (1984), encontró valores de lignina entre 15 y 22%, por su parte Dadswell *et al.* (1962), reportan en *E. regnans* valores de 20 – 27% de lignina, Gutmann *et al.* (1971), obtienen para *E. globulus* 23.2% de lignina, Mansilla *et al.* (1991), para la misma especie encuentran 20% de lignina, Paz (1994), Paz, Pérez (1999), reportan

en *E. globulus* 23% de lignina a 8 años y 20.4% a 19 años de edad, Ona *et al.* (1997), reportan a lo largo del fuste de *E. globulus* valores de 21.6 a 42.8%, Paredo (1999), en árboles de 8 a 10 años de *E. globulus* obtiene valores de lignina de 19.5 y 20.5% respectivamente. Pereira *et al.* (2000), analizando varios eucaliptos de 10.5 años, encuentran en *E. citriodora* 22.4% de lignina, y en *E. saligna* 26.3%.

Akira *et al.* (2003) en su estudio reportan valores de lignina para Eucaliptos como: *E. tereticornis* (32.22%), *E. punctata* (27.13%), *E. siderophloia* (34.65%), *E. melanophloia* (34.03%), *E. resinifera* (35.5%), *E. nesophylla* (31.42%), *E. grandis* (25.88%), *E. paniculata* (27.2%), *E. robusta* (29.85%), *E. dunii* (24.97%), *E. paeotricha* (27.38%), *E. saligna* (26.08%), y *E. urophylla* (26.7%). Estudiando a diferentes alturas en albura y duramen Barahona (2005), reporta para *E. globulus* en albura, 17.51% a 0.9m, 16.35% a 8.9m, 17.78% a 16.3m y 17.92% a 21.3m, y para duramen, 20.37% a 0.9m y 19.38% a 8.9m.

Pedraza (2006), recientemente obtuvo valores de por ciento de lignina para corteza de *E. camaldulensis* 9.0%, *E. citriodora* 17.7%, *E. robusta* 29.0%, y *E. saligna* 14.0%. Los valores de lignina obtenidos en el presente trabajo para albura y duramen se encuentran dentro del rango reportado por Hillis (1984), estando solamente la albura en la parte baja de *E. robusta* y *E. saligna* ligeramente arriba de dicho rango.

Siguen la pauta de lo obtenido por los autores ya mencionados a excepción de los valores que reportan Pereira *et al.* (2000) para *E. citriodora* y *E. saligna* que son más altos que los encontrados en este estudio para albura y duramen a las dos alturas, y en Akira *et al.* (2003) también son superiores incluyendo a *E. saligna* y *E. robusta* que son objeto de estudio en este trabajo, en cuanto a las dos alturas en albura y duramen, comparando con lo reportado por Barahona (2005) podemos mencionar que los valores en este trabajo son mayores que los mencionados para *E. globulus* existiendo mayor porcentaje en la albura que en el duramen.

En cuanto a los valores obtenidos para corteza por Pedraza (2006), únicamente la corteza de *E. robusta* supera en porcentaje a la madera de las tres especies, los valores para *E. citriodora* y *E. saligna* en corteza son inferiores.

Holocelulosa

Los valores presentados en las tablas 2 y 3 en el capítulo de resultados para holocelulosa fueron en albura de la parte baja de 80.90 para *E. citriodora*, 46.17 para *E. robusta* y 51.05 en *E. saligna*, en la parte alta se obtuvieron 78.35 en *E. citriodora*, 40.58 en *E. robusta* y 48.09 en *E. saligna*. En cuanto a la parte baja en el duramen tenemos 56.33 en *E. citriodora*, 81.69 para *E. robusta* y 66.03 para *E. saligna*, y en la parte alta 42.78 para *E. citriodora*, 63.69 en *E. robusta*, y 68.41 en *E. saligna*.

Estadísticamente, la cantidad de holocelulosa presente en la madera resultó ser mayor en *E. citriodora*, seguida de *E. saligna* y por último *E. robusta* con la menor cantidad encontrando diferencia significativa (Tabla 22) entre *E. citriodora* y *E. robusta*, ninguna entre *E. citriodora* y *E. saligna*, tampoco entre *E. robusta* y *E. saligna* (Fig. 33, Tabla 23).

Referente a la altura el contenido de holocelulosa se encuentra en mayor proporción en la parte baja de los árboles por encima de la parte alta lo que también indica que hay diferencia significativa (Fig. 34, Tablas 22 y 24). Con respecto a la albura y el duramen no existe diferencia alguna entre las zonas (Fig. 35, Tablas 22 y 25).

Referente al contenido de holocelulosa en madera de Eucaliptos encontramos datos de Dadswell *et al.* (1962), que obtienen para *E. regnans* valores de holocelulosa de 75 a 82%, Rowell (1984), reporta 74% de holocelulosa en *E. kirtoniana* y *E. saligna*, Akira *et al.* (2003) en su estudio reportan valores de holocelulosa en Eucaliptos como: *E. tereticornis* (56.37%), *E. punctata* (63.98%), *E. siderophloia* (52.49%), *E. melanophloia* (56.83%), *E. resinifera* (52.5%), *E. nesophylla* (59.7%), *E. grandis* (69.18%), *E. paniculata* (66.84%), *E. robusta* (61.04%), *E. dunii* (66.14%), *E. paeotricha* (63.23%), *E. saligna* (64.45%), y *E. urophylla* (63.62%), Pedraza (2006), obtiene valores de holocelulosa en corteza de *E. camaldulensis* (48.6%), *E. citriodora* (45%), *E. robusta* (44.4%) y *E. saligna* (47.9%).

Comparando los datos obtenidos de albura y duramen en las especies estudiadas con los valores reportados en la literatura, podemos mencionar que las cantidades de holocelulosa reportadas, son muy similares a las reportadas por Akira *et al.* (2003), solamente la albura de *E. citriodora* a las dos alturas estuvo por encima de estos valores, así como el duramen en la parte baja de *E. robusta* entrando en el rango mencionado por Dadswell *et al.* (1962), el duramen en la parte alta de *E. citriodora*, la albura en la parte alta de *E. saligna* y la albura de *E. robusta* a las dos alturas presentaron valores más bajos que los reportados por Akira *et al.* (2003).

Aún cuando es conocido que el contenido de polisacáridos en la corteza es bajo en relación a la madera (Fengel, Wegener 1983), se obtuvieron algunos valores por debajo de los que reporta Pedraza (2006) para las cortezas de las mismas especies posiblemente debido a errores experimentales.

Azúcares

Como se mencionó con anterioridad la identificación y cuantificación de azúcares se llevó a cabo en harina libre de extractos (Figura 8), y el análisis arrojó los siguientes resultados, para la albura y duramen de las especies de Eucalipto

estudiadas, mostrados en las tablas 26 y 27 representados gráficamente en las figuras 36 y 37, respectivamente en el capítulo de resultados, donde se aprecia que la especie con mayor cantidad de azúcares fue *E. saligna*, tanto en albura como en duramen siendo mayor en albura, y mayor en la parte alta del árbol refiriéndonos concretamente a la glucosa y xilosa, sin observar lo mismo en cuanto a *E. citriodora* y *E. robusta* ya que la proporción es mayor en la parte baja existiendo más xilosa en *E. citriodora* que en *E. robusta*, en duramen igualmente *E. citriodora* contiene más xilosa que *E. robusta* y también es mayor en la parte alta.

Analizando los valores reportados en este estudio, sin hacer alusión a la glucosa puesto que los valores para la misma son altos por lógica, el azúcar con mayor porcentaje fue la xilosa, el contenido de xilosa reportó valores de 26.14% en la albura de *E. saligna* a 1.53% en duramen de *E. robusta*, en lo que refiere a arabinosa, galactosa y manosa.

Como es notable los valores de xilosa son ligeramente superiores, siendo típico para madera de latifoliadas (Fengel, Wegener 1983), la presencia de estos azúcares en la albura fue mayor en *E. saligna*, seguida por *E. citriodora* y por último *E. robusta* con la menor cantidad, en el duramen la arabinosa fue mayor en *E. saligna* y menor en *E. robusta*, galactosa mayor en *E. saligna* y menor en *E. citriodora*, y manosa mayor en *E. saligna* y menor en *E. robusta* y mostraron los siguientes valores, en arabinosa tenemos 2.30 en albura de *E. saligna* como valor más alto y 0.13 en duramen de *E. robusta* como mínimo, en galactosa tenemos el valor máximo de 10.64 en albura de *E. saligna* a 0.26 en albura de *E. citriodora*, la manosa presentó el valor más alto en *E. saligna* con 1.55 y el más bajo en *E. robusta* con valores por debajo de 0.10 en albura y duramen.

Pedraza (2006) reportó valores para el contenido de azúcares en corteza de *E. camaldulensis*: 1.91 arabinosa, 2.12 galactosa, 15.62 glucosa, 8.87 xilosa, en *E. citriodora*: 2.22 arabinosa, 1.52 galactosa, 14.14 glucosa, 9.95 xilosa, para *E. robusta*: 0.39 arabinosa, 0.41 galactosa, 0.9 glucosa, 1.13 xilosa, y en *E. saligna*: 1.57 arabinosa, 2.91 galactosa, 13.25 glucosa, 14.91 xilosa, no obteniendo indicios de manosa en su análisis, y poniendo de manifiesto que el porcentaje de xilosa es mayor que los de arabinosa, y galactosa en especies latifoliadas.

Aún cuando los valores obtenidos de glucosa y xilosa son mayores a los de los otros azúcares para la albura y duramen en los Eucaliptos, a excepción de *E. saligna*, estos resultan muy bajos en porcentaje, lo que se podría atribuir a errores experimentales al momento de llevar a cabo los análisis en el equipo de cromatografía (HPLC), o a efectos al llevar a cabo las hidrólisis que pudieran haberse suscitado, cayendo en una degradación excesiva de los azúcares, o en su defecto, a que la hidrólisis no se haya llevado a cabo en su totalidad, utilizando

condiciones exactamente iguales para las tres especies, pudiendo ser más agresivas en una que en otra. Por otra parte, hacer una comparación con los valores de holocelulosa resulta un poco difícil debido a que las condiciones con las que se llevaron a cabo las determinaciones de holocelulosa pudieron también llevarnos a errores experimentales.

Poder Calorífico

Los valores del análisis calorimétrico para albura y duramen de las especies estudiadas presentados en la tabla 28, en el capítulo de resultados, muestran que los valores más altos se tuvieron en harina sin extraer en comparación con harina libre de extractos, siendo más alto también en las muestras de albura que en las de duramen, solamente se observa una variación en *E. citriodora*, en el cual los valores son inversos en albura y duramen en harina sin extracto.

El valor calorífico más alto se obtuvo en *E. saligna* con 4118.43 cal/g (17.243 MJ/Kg) en albura y el más bajo lo tuvo *E. robusta* con 3679.33 cal/g (15.404 MJ/Kg) en duramen para harina sin extraer, en el caso de la harina libre de extractos el valor más alto lo tuvo *E. saligna* con 3935.33 cal/g (16.476 MJ/Kg) en albura y el menor fue para *E. robusta* con 3668.43 cal/g (15.359 MJ/Kg) en duramen.

El valor calorífico de la madera depende mucho de las especies y de la parte del árbol aprovechada (FAO 1991), así como también depende de otros factores tales como el contenido de humedad, el tamaño de las partículas, el tipo y eficiencia del equipo de combustión entre otros.

Pereira *et al.* (2000), reportan valores de poder calorífico superior en árboles de *Eucalyptus* de 10.5 años de edad y de diversas procedencias como: *E. camaldulensis* var. *obtusa* 5085 cal/g, *E. citriodora* 4718 cal/g, *E. cloeziana* 4437 cal/g, *E. grandis* 4340 cal/g, *E. maculata* 4364 cal/g, *E. microcorys* 4823 cal/g, *E. pellita* 4537 cal/g, *E. pilularis* 4548 cal/g, *E. propinqua* var. *propinqua* 4888 cal/g, *E. saligna* 4633 cal/g, *E. tereticornis* 4378 cal/g y *E. urophylla* 4312 cal/g.

Los valores obtenidos en este trabajo para las especies estudiadas en harina sin extraer y harina libre de extracto, en albura y duramen resultan muy por debajo de los datos que mencionan estos autores recalcando *E. citriodora* y *E. saligna*, puesto que son parte de este estudio; Wang *et al.* (1982), menciona que *E. robusta* tiene valor calorífico de 19,628 Kj/Kg dejando claro lo dicho anteriormente puesto que no se puede saber bajo que condiciones se realizaron las determinaciones en los trabajos citados.

Camps, Marcos (2002), determinan valores de poder calorífico en algunas especies forestales, reportando en *Pinus* spp. rangos de 18.062 MJ/Kg a 15.396 MJ/Kg, y en

Quercus spp. de 23.274 MJ/Kg a 13. 832 MJ/Kg, en los cuales entran los valores obtenidos para la albura y duramen de los Eucaliptos de este trabajo (Tabla 28), no olvidando que se trata de otras maderas totalmente diferentes.

Por otra parte, los mejores valores de poder calorífico fueron los de *E. saligna*, seguido por *E. robusta* y al final *E. citriodora*, de igual forma son más altos en madera sin extraer que en madera libre de extractos, coincidiendo con lo que reportan Barrichelo *et al.* (1980), quienes evaluaron el potencial energético de algunas especies de Eucalyptus de tres años de edad, entre ellos *E. saligna*, *E. robusta* y *E. citriodora* y concluyeron que *E. saligna* mostró los mejores resultados como combustible, *E. robusta* tuvo el menor rendimiento y *E. citriodora* el peor.

9. CONCLUSIONES

Al determinar la composición química del duramen y la albura de *Eucalyptus citriodora*, *E. robusta*, *E. saligna* en dos diferentes alturas del fuste, provenientes de la plantación experimental de Crisoba Industrial, Morelia., se obtuvieron las siguientes conclusiones:

1. El duramen de las especies de eucalipto estudiadas presenta mayor acidez que la albura. La parte baja del árbol tomada a 1.20 metros es más ácida que la parte alta tomada a 6.30 metros de altura.
2. Estadísticamente la especie con mayor acidez resultó ser *E. robusta* y con la menor fue para *E. citriodora*.
3. Las cantidades de sustancias inorgánicas resultaron muy por debajo de las que se reportan para las cortezas de las mismas especies estudiadas por Pedraza (2006).
4. En base a la estadística, la especie que menor proporción de sustancias inorgánicas presenta es *E. robusta*, y *E. citriodora* es la que mayor cantidad tiene. La albura resultó ser más rica en cenizas que el duramen de estos eucaliptos.
5. En cuanto a la cantidad de extraíbles, se encontró diferente proporción de los mismos entre las especies, a las dos alturas del árbol y en las dos zonas. La mayor cantidad de extraíbles se concentra en parte baja de árbol, el porcentaje en duramen es mayor al de albura, y en los árboles el que presentó el mayor contenido fue *E. robusta*.
6. En relación a los solventes utilizados la mayor proporción de extraíbles se obtuvo en Acetona y Metanol, seguida por Agua caliente y por último Ciclohexano, con ligeras variantes en las especies.
7. En la albura y en el duramen de los eucaliptos estudiados hay menor cantidad de extraíbles que en la corteza de las mismas especies (Pedraza 2006).
8. El porcentaje de lignina estadísticamente resultó ser mayor en *E. saligna* y menor en *E. citriodora*, mayor en la parte baja del árbol y en la albura.
9. Estadísticamente la madera de *E. citriodora* contiene mayor cantidad de holocelulosa y *E. robusta* la menor, existiendo más en la parte baja del árbol.
10. La especie que presentó mayor contenido de azúcares en albura y duramen fue *E. saligna*, con más cantidad en albura y en la parte alta del fuste.
11. Se encontró mayor cantidad de Xilosa en relación a Arabinosa, Galactosa y Manosa, resultando lógico por tratarse de especies latifoliadas.

12. Los valores más altos de poder calorífico son para *E. saligna*, seguido por *E. robusta* y por *E. citriodora*, siendo más altos en madera sin extraer que en madera libre de extractos.

10. RECOMENDACIONES

1. Por la baja cantidad de lignina y el alto porcentaje de holocelulosa sumado al estudio de pulpeo realizado por Rodríguez (2006) se recomienda *Eucalyptus citriodora* para la producción de papel.
2. Realizar estudios de cromatografía de los extractos obtenidos con los diversos solventes utilizados e identificar los posibles compuestos presentes en cada uno.
3. Con la finalidad de la utilización integral de las especies determinar las propiedades químicas en ramas y hojas las cuales se consideran desperdicio.
4. Realizar valoraciones calorimétricas de las especies sin separar la albura del duramen para ver si el poder calorífico aumenta en la madera competa.
5. Implementar los análisis de calorimetría cuando se desee realizar estudios integrales de investigación sobre la madera.
6. En futuros análisis de azúcares, realizar variaciones en las condiciones de hidrólisis con la finalidad de verificar si se pueden optimizar los resultados.
7. Considerar las tres especies estudiadas como fuente potencial de materia prima para la producción de pulpa celulósica y generación de energía.

11. BIBLIOGRAFÍA

Akira Mori F, Marin Mendes L, Trugilho P F, das Graças Cardoso M (2003) Use of wood of *Eucalyptus* sp and native in the storage of the sugar cane spirit, *Ciência e Tecnologia de Alimentos*. vol. 23, no. 3 Campinas.

Andrae F, Krapfenbauer A (1979) Studies on biomass and nutrients in 4-yr. old *Eucalyptus saligna* plantation in Santa Maria, Brazil. *Centralblatt fur Gesamte Forstwesen* 96(1):1-29.

ASTM (2000) Annual book of ASTM standards. (Designation D 1104-56, Reapproved 1978). West Conshohocken, PA. EUA.

Atal C K, Kapur B M (1982) (eds.) Cultivation and utilization of medicinal plants. Regional Research Laboratory. Jammu - Tawi, India. 877 p.

Bamber R K, Curtin R A (1974) "Some properties of wood in blackbutt trees of two ages", *Aust. For.* 36 p., 226-234.

Barahona Olmos G L (2005) Variación de la composición química en albura, duramen y altura de Madera pulpable de *Eucalyptus globulus*, proveniente de monte alto y monte bajo. Tesis Profesional. Universidad de Chile. Chile.

Bové J K (2000) Conservación y Silvicultura de Especies Forestales de Honduras, CONSEFORH.
http://www.okstate.edu/OSU_Ag/honduras/Papers/CONSEFORH/conseforh.html

Bland D E (1985) "The composition and Analysis of *Eucalyptus* wood" *Appita*, Vol. 38, N°4, p. 291-294.

Carballo L R (1989) "The influence of chemical composition and age of caribea pine wood (*Pinus caribea*) on the physical and mechanical properties as well as on the yield of sulfite pulp" Report of Candidate Minimum Examination Faculty of wood Technology, University College of Forestry and Wood Technology. Zvolen. Rep. Eslovaca.

Conde E, Cadahía E, García-Vallejo M C, Tomás-Barberán F (1995) Low molecular weight polyphenols in wood and bark of *Eucalyptus globulus*. *Wood and Fiber Science* 27(4): 379-383.

Da Silva Oliveira J T, Chagas de Souza L, Della Lucia R M, de Souza Júnior W P (2005) Influência dos extractivos na Resistência ao Apodrecimento de seis espécies de Madeira. *R. Árvore*, Viçosa-MG, v.29, n.5, p.819-826, Sociedade de Investigações Florestais.

Dadswell H E, Wardrop A B, Watson A J (1962) "The morphology, Chemistry and pulp characteristics of reaction wood", Fundamentals of Papermaking Fiber, publ. Tech. Sect. Brit. Paper and Board Marker's Assoc. Inc, p.187-219

Dillner B *et al.* (1970) The breeding of E. globulus on the basis of wood density, chemical composition and growth rate. In the Production and Industrial Utilization of Eucalyptus Symposium in Lisboa, Supplement 5 to V. XXIII, Timber Bulletin for Europe, FAO, Roma, p. 120-155.

Downes G M, Hudson I L, C A Raymond, G H Dean, A J Michell, L R Schimleck, R Evans, A Muneri (1997) Sampling Plantation Eucalypts for wood and fibre properties. CSIRO. Australia.

Duke J A, Wain K K (1981). Medicinal plants of the world. Computer index with more than 85,000 entries. 3 vols.

Duke J A (1983) Handbook of Energy Crops. Unpublished.

FAO (1956) El eucalipto en la repoblación forestal. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. N°11. Roma, Italia.

FAO (1981) El eucalipto en la repoblación forestal. Roma, Italia.

FAO (1991) Conservación de energía en las industrias mecánicas forestales. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.

Fengel D, Wegener G (1983) Wood: Chemistry, Ultrastructure, Reactions. Walter de Gruyter. Berlin.

Fenton R, Roper R E, Watt G R (1977). Lowland tropical hardwoods. External Aid Division, Ministry of Foreign Affairs. Wellington, N. Z.

Gutiérrez A, del Río J C, Gonzales-Vila F J, Martín F (1999) Chemical Composition of Lipophilic Extractives from *Eucalyptus globulus* Labill. Wood. Holzforschung. 53: 481-486.

Gutmann P, Pistono L, Bluhm E, (1971) Serie de Investigación. Publicación No. 3, Análisis Químico de la Madera de Eucalipto (*Eucalyptus globulus* Labill.) creciendo en Chile. Instituto Forestal. Chile. 29 p (*In*: Barahona Olmos G L 2005) Variación de la composición química en albura, duramen y altura de madera pulpable de *Eucalyptus globulus*, proveniente de monte alto y monte bajo. Tesis Profesional. Universidad de Chile. Chile).

Hillis W E (1971) Distribution Properties and Formation of Some Wood Stability. Wood Sc. Technol. 5: 272-289.

Hillis W E (1987) Heartwood and Tree Exudates. Springer Series in Wood Science. Springer-Verlag. Alemania.

Hillis W E, Brown A G (1984) *Eucalyptus* for wood production. CSIRO, Academic Press. Australia.

Jiménez M C, Romero A, Okulik N, Judis M A (1998) CONTENIDO DE ESENCIAS EN EJEMPLARES DE *Eucalyptus citriodora* EN ROQUE SÁENZ PEÑA, CHACO, Quebracho No. 7: (67-71)

Kambu K, D Phanzu N, Coune C, Wauters J N, Angenot L (1982). Contribution to the study of the insecticidal and chemical properties of *Eucalyptus saligna* of Zaire. Plant. Med. Phytother. 16(1):34–38.

Krilov A, Lasander W H (1989) Concentration, Distribution and Variability of Butanol-soluble Phenolic Compounds in Eucalypt Heartwood. *Holzforschung* 43(1): 49-54.

Little E L Jr. (1983) Common fuelwood crops: a handbook for their identification. McClain Printing Co., Parsons, WV.

Macías Díaz J E (1993) Alternativas para el establecimiento de plantaciones forestales para la producción de material celulósico en el Estado de Michoacán. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. México. 40 p.

Mansilla H, García R, Tapia J, Durán H, Urzúa S, (1991) Chemical characterization of Chilean Hardwoods. *Wood Sci. Technol.* (25): 145-149.

Martínez Suárez J G (1988) Los Eucaliptos en la producción de madera con fines industriales para Michoacán. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, México.

Migliorini A J, Barrichelo L E G, Brito J O, Galvão da Silva M (1980) Avaliação do potencial energético de algumas espécies de *Eucalyptus*. CIRCULAR TÉCNICA No. 107. <http://www.ipef.br/publicacoes/ctecnica/nr107.pdf>

Montgomery D C (1991) Diseño y análisis de experimentos. Grupo Editorial Iberoamérica. México.

Montoya-Oliver J M (1995) El Eucalipto. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid.

Morton J F (1981) Atlas of medicinal plants of middle America. Bahamas to Yucatan. C. C. Thomas, Springfield, IL.

N A S (1980a.) Firewood crops. Shrub and tree species for energy production. National Academy of Sciences, Washington, DC.

Ona T, Sonoda T, Ito K, Shibata M (1997) "Relationship of lignin content, lignin monomeric composition and hemicellulosic composition in the same trunk sought by their within tree variation in *E. camaldulensis* and *E. globulus*", *Holzforchung* 51, p. 396-404.

Ona T, Sonoda T, Ito K, Shibata M, Tamai Y, Kojima Y (1995b) *Japan, Tappi* 49, p. 1567.

Paz J (1994) Características físicas, químicas y biométricas de distintas especies de Eucaliptos y su aptitud pulpable (*In: Barahona Olmos G L 2005*) Variación de la composición química en albura, duramen y altura de madera pulpable de *Eucalyptus globulus*, proveniente de monte alto y monte bajo. Tesis Profesional. Universidad de Chile. Chile).

Paz J, Pérez L (1999) Análisis comparativo de las propiedades microscópicas y macroscópicas de la madera de *Eucalyptus nitens* y *Eucalyptus globulus* (*In: Barahona Olmos G L 2005*) Variación de la composición química en albura, duramen y altura de madera pulpable de *Eucalyptus globulus*, proveniente de monte alto y monte bajo. Tesis Profesional. Universidad de Chile. Chile).

Pedraza Bucio F E (2006) Composición Química de la Corteza de 4 Especies de Eucalipto y Evaluación de las Propiedades de sus Extractos Tánicos. Tesis de Maestría. Morelia; Mich.

Penner M H *et al.* (1996) Acid-catalyzed hydrolysis of lignocellulosic extracted materials., ACS., Series, p. 14.

Peredo M (1999) Propiedades de la madera y aptitud pulpable de algunas especies de Eucaliptos de la madera de *Eucalyptus nitens* y *Eucalyptus globulus* (*In: Barahona Olmos G L 2005*) Variación de la composición química en albura, duramen y altura de madera pulpable de *Eucalyptus globulus*, proveniente de monte alto y monte bajo. Tesis Profesional. Universidad de Chile. Chile).

Pereira H (1988) Variability in the chemical composition of plantation *Eucalyptus* (*E. globulus* Labill). *Wood and Fiber Science* 20(1): 82-90.

Pereira H, Sardinhas R (1984) Chemical composition of *Eucalyptus globulus* Labill. *Appita* 37(8): 661-664.

Pereira H, Miranda I (1991) "The chemical composition of wood and bark of fast-grow *eucalyptus globulus* L. trees during the first 3 years", Dpto de Engenharia Florestal, Universidade Técnica de Lisboa, Portugal.

Pereira J C D, Sturion J A, Higa A R, Higa R C V, Shimizu J Y (2000) Características da madeira de algumas espécies de eucalipto plantadas no Brasil. Colombo: Embrapa Florestas. 113 p.

Perry L M (1980) Medicinal plants of east and southeast Asia. MIT Press, Cambridge.

Ramos Pantaleón D (2003) Aislamiento y Fraccionación de Sustancias Extraíbles de la Madera de *Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb. ("Parota"). Tesis de Maestría. Morelia; Mich.

REIS M S (1973) Variation in decay resistance of four wood species from Southeastern Brazil. Holzforshung, v.27, n.3, p.103-111.

Rowell M R (1984) The Chemistry of Solid Wood. American Chemical Society, Washington, D. C. U.S.A.

Runkel R O H, Wilke K D (1951) Zur Kenntnis des thermoplastischen Verhaltens von Holz. Holz Roh Werkstoff. 9: 260-270.

Rutiaga Quiñones J G (2001) Químicas y biológicas Untersuchungen zum Verhalten dauerhafter Holzarten und ihrer Extrakte gegenüber holzabbauenden Pilzen. Buchverlag Gräffelfing. München.

Sandermann W, Rothkamm M (1959) Über die Bedeutung der pH-Werte von Handelshölzern und deren Bedeutung für die Praxis. Holz Roh Werkstoff. 17: 433-440

Sardinhas, R, Melo J R, Morais M H A (1979) "Anais Instituto Superior de Agronomia" Lisboa, Vol. XXXVIII, p. 91.

Shiraishi N *et al.* (1991) Wood and Cellulose Chemistry, pp 1225. (*In*: David N, Hon S C (Eds). University South Carolina. U. S.).

Stafford A M, Pazoles C J (1997) Harvesting Phytochemical diversity for drug discovery: The phytera approach. Edit. Stephen Wrigley and Co. The Royal Society of Chemistry.

Swan B, Akerblom I S (1967) "Wood extractives from *E. globulus*", Svensks Popp. Tedsn 70, p. 239-244.

TAPPI (2000) Test Methods TAPPI Press. Atlanta.

TAPPI (1978) T-parr-1341 ns 78

Téllez Sánchez C (2004) Descripción anatómica, caracterización físico-mecánica y análisis químico de la madera de *Andira inermis* (W. Wright) DC. Tesis de Maestría. Morelia; Mich.

Tischler K (1976) Improvement of *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh wood. PhD Tesis, Hebrew Univ, Jerusalem Israel, 129 pp.

Trendelemborg R (1936) Das Holz als Rohstoff. J. F. Lehmanns Verlag. München/Berlin.

Trugilho P F, Freire de Carvalho Marcondes M, Tarcísio Lima J, Akira Mori F (2000) CORROSÃO E DESGASTE QUÍMICO DAS LÂMINAS DE AÇO UTILIZADAS NO DESDOBRO DA MADEIRA, <http://www.dcf.ufla.br/cerne/Revistav8n22002/art%2003%20008%2002%20Editorado.doc>.

Valério Firme L F (2003) Determinação de taninos condensados em madeiras de eucaliptos e sua influência na qualidade da cachaça. Wagenführ R y Scheiber Chr (1974) Holzatlas. VEB Fachbuch. Leipzig.

Wang S L, Huffman J B, Rockwood D L (1982) Qualitative evaluation of fuelwood in Florida—a summary report. Econ. Bot. 36(4):381–388.

Watt J M, Breyer-Brandwijk M G (1962) The medicinal and poisonous plants of southern and eastern Africa. 2nd ed. E.&S. Livingstone, Ltd., Edinburgh and London. http://www.mag.gob.sv/admin/publicaciones/upload_file/1121114265_82.pdf

Webb D E, Wood P J, Smith J (1980) A guide to species selection for tropical and sub-tropical plantations. Tropical Forestry Papers 15. CFI, Oxford.

Weissmann G, Kubel H, Lange W (1989) Untersuchungen zur Cancerogenität von Holzstaub – Die Extraktstoffe von Eichenholz (*Quercus robur* L.). Holzforschung 43(2): 75-82.

Wilkes J (1984) The influence of rate of growth on the density and heartwood extractives content of eucalypt species. Wood Science Technology. 18: 113-120.

Yoshinaga A, Fujita M, Saiki H (1993) "Composition of lignin building units and neutral sugar in Oak Xilem tissue", Mokussai Gakkaishi 39, p. 621- 627.

12. APÉNDICES

Propiedades químicas de la albura					
Especie	pH	Cenizas %	Extracto total %	Lignina %	Holocelulosa %
<i>E. ci</i>	4.50	0.34	4.26	20.53	79.62
<i>E. ro</i>	4.67	0.28	3.62	22.36	43.37
<i>E. sa</i>	4.66	0.46	3.24	22.45	49.57

A. Valores promedio de la composición química de la albura

Propiedades químicas del duramen					
Especie	pH	Cenizas %	Extracto total %	Lignina %	Holocelulosa %
<i>E. ci</i>	3.79	0.47	7.03	19.05	49.55
<i>E. ro</i>	3.13	0.24	10.64	21.81	72.69
<i>E. sa</i>	3.30	0.15	6.71	22.19	67.22

B. Valores promedio de la composición química del duramen

% de azúcares en la Albura					
Especie	Arabinosa	Galactosa	Glucosa	Xilosa	Manosa
<i>E. ci</i>	0.44	0.99	2.06	14.44	0.09
<i>E. ro</i>	0.17	1.27	4.35	2.06	0.04
<i>E. sa</i>	1.53	8.77	32.70	23.79	1.47

C. Valores promedio del % de azúcares en la albura

% de azúcares en el Duramen					
Especie	Arabinosa	Galactosa	Glucosa	Xilosa	Manosa
<i>E. ci</i>	0.36	0.60	5.60	4.33	0.19
<i>E. ro</i>	0.17	0.90	3.44	1.95	0.04
<i>E. sa</i>	0.69	4.76	30.39	19.37	0.33

D. Valores promedio del % de azúcares en el duramen