



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE INVESTIGACIÓN PARA**  
**EL DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL**  
**UNIDAD DURANGO**

---

EVALUACIÓN QUÍMICA DE SUBPRODUCTOS DE *Cedrela odorata*  
L. (CEDRO ROJO) Y PROPUESTA DE GESTIÓN PARA SU  
APROVECHAMIENTO

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE:  
MAESTRA EN CIENCIAS EN GESTIÓN AMBIENTAL

PRESENTA

ARIANA BERENICE SANTOS GARCÍA

DIRECTORAS DE TESIS

DRA. MARTHA ROSALES CASTRO

DRA. MARÍA ELENA PÉREZ LÓPEZ

Victoria de Durango, Dgo. Diciembre de 2014



# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

## ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de Durango, Dgo. siendo las 10:00 horas del día 18 del mes de Noviembre del 2014 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación del: CIIDIR-IPN Unidad Durango para examinar la tesis titulada:  
Evaluación química de subproductos de Cedrela odorata L. (cedro rojo) y propuesta de gestión para su aprovechamiento

Presentada por el alumno:

Santos	García	Ariana Berenice
Apellido paterno	Apellido materno	Nombre(s)
Con registro:		
B	1	2
0	6	3
		1

aspirante de:

### MAESTRÍA EN CIENCIAS EN GESTIÓN AMBIENTAL

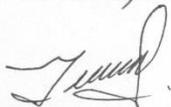
Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

### LA COMISIÓN REVISORA

Directores de tesis

  
Dra. Martha Rosales Castro

  
Dra. María Elena Pérez López

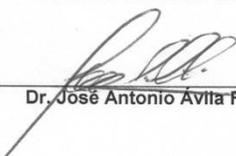
  
M. C. María Guadalupe Vicencio de la Rosa

  
Dr. Gustavo Pérez Verdín

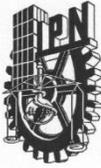
  
Dra. Araceli Loredo Treviño

  
Dr. Jesús Herrera Corral

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

  
Dr. José Antonio Avila Reyes

CENTRO INTERDISCIPLINARIO  
DE INVESTIGACIÓN PARA EL  
DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL  
C.I.I.D.I.R.  
UNIDAD DURANGO  
I.P.N.



# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARIA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

## ACTA DE REGISTRO DE TEMA DE TESIS Y DESIGNACIÓN DE DIRECTORES DE TESIS

México, D.F. a 5 de junio del 2013

El Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de CIIDIR Durango en su sesión ordinaria No. 5 celebrada el día 4 del mes de junio conoció la solicitud presentada por el(la) alumno(a):

SANTOS

GARCÍA

ARIANA BERENICE

Apellido paterno

Apellido materno

Nombre (s)

Con registro: 

B	1	2	0	6	3	1
---	---	---	---	---	---	---

Aspirante de: Maestría en Ciencias en Gestión Ambiental

1.- Se designa al aspirante el tema de tesis titulado:  
Evaluación química de subproductos de *Cedrela odorata* L. (cedro rojo) y propuesta de gestión para su aprovechamiento

De manera general el tema abarcará los siguientes aspectos:

2.- Se designan como Directores de Tesis a los Profesores:  
Dra. Martha Rosales Castro y Dra. María Elena Pérez López

3.- El trabajo de investigación base para el desarrollo de la tesis será elaborado por el alumno en:  
CIIDIR-IPN Unidad Durango  
que cuenta con los recursos e infraestructura necesarios.

4.- El interesado deberá asistir a los seminarios desarrollados en el área de adscripción del trabajo desde la fecha en que se suscribe la presente hasta la aceptación de la tesis por la Comisión Revisora correspondiente:

Directores de Tesis

Dra. Martha Rosales Castro

Aspirante

Dra. María Elena Pérez López

Presidente del Colegio

Ariana B. Santos G.  
Ing. en Sist. Amb. Ariana Berenice Santos García

CENTRO INTERDISCIPLINARIO  
DE INVESTIGACIÓN PARA EL  
DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL  
CIIDIR  
UNIDAD DURANGO  
I.P.N.



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

*CARTA CESIÓN DE DERECHOS*

En la Ciudad de México, D.F. el día 18 del mes de Noviembre del año 2014, la que suscribe Ariana Berenice Santos García alumna del Programa de Maestría en Ciencias en Gestión Ambiental, con número de registro B120631, adscrita al Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional Unidad Durango, CIIDIR-IPN Unidad Durango, manifiesta que es la autora intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de la Dra. Martha Rosales Castro, de la Dra. María Elena Pérez López y cede los derechos del trabajo titulado "Evaluación química de subproductos *Cedrela odorata* L. (cedro rojo) y propuesta de gestión para su aprovechamiento", al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso de la autora y/o directoras del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a las siguientes direcciones [ariana\\_sant07@hotmail.com](mailto:ariana_sant07@hotmail.com), [mrciidir@yaho.com](mailto:mrciidir@yaho.com) y [maelena0359@yahoo.com](mailto:maelena0359@yahoo.com). Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

*Ariana B. Santos G.*  
ARIANA BERENICE SANTOS GARCÍA

LA PRESENTE INVESTIGACIÓN SE REALIZÓ EN EL CENTRO  
INTERDISCIPLINARIO DE INVESTIGACIÓN PARA EL DESARROLLO  
INTEGRAL REGIONAL UNIDAD DURANGO DEL INSTITUTO  
POLITÉCNICO NACIONAL, EN LOS LABORATORIOS DE FITOQUÍMICA  
Y DE CIENCIAS AMBIENTALES. BAJO LA DIRECCIÓN DE LA  
DRA. MARTHA ROSALES CASTRO Y LA  
DRA. MARÍA ELENA PÉREZ LÓPEZ

## **DEDICATORIA**

*DEDICO ESTE TRABAJO A MIS PADRES LA*

*SRA. MARÍA TRINIDAD GARCÍA JÁQUEZ*

*Y EL SR FRANCISCO SANTOS PASTRANA*

*POR NO SOLTAR MI MANO CUANDO SENTÍA QUE EL CAMINO SE  
TERMINABA Y ENSEÑARME A NUNCA RENDIRME.*

*POR LA MOTIVACIÓN CONSTANTE QUE ME HA PERMITIDO SER UNA  
PERSONA DE BIEN, Y MÁS QUE NADA, POR SU AMOR.*

*A MI ABUELITO JUAN GARCÍA GARCÍA †*

*AL CUAL LA VIDA NO LE ALCANZO PARA VER CONCLUIDO ESTE LOGRO.*

## **AGRADECIMIENTOS**

A mis padres la Sra. Mary y el Sr, Francisco, a mis hermanos Arely, Paco, Analy, Alondra y mis sobrinos Gizehl, Daniel y Pablito, por el apoyo que siempre me dieron.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo económico brindado para realización de estudios de maestría.

Al Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, (CIIDIR-IPN Unidad Durango) por la formación académica recibida en sus aulas.

A mis directoras de tesis: la Dra. Martha Rosales Castro y la Dra. María Elena Pérez López por compartir su tiempo y conocimientos, pero sobre todo por su paciencia durante el desarrollo de la tesis.

A mis asesores de tesis: M.C María Guadalupe Vicencio de la Rosa y el Dr. Gustavo Pérez Verdín, por sus consejos y recomendaciones.

A mis revisoras de tesis: la Dra. Araceli Loredó Treviño y el Dr. Jesús Herrera Corral por realizar importantes aportaciones a mi trabajo.

A las chicas encargadas de laboratorio: Sandra, Margarita y Ariana por la ayuda brindada.

A los amigos que siempre estuvieron cuando los necesite: Sergio, Karina, Oscar y Joel.

## ÍNDICE

GLOSARIO.....	i
LISTA DE ACRÓNIMOS.....	iii
ÍNDICE DE TABLAS.....	v
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vii
RESUMEN.....	viii
ABSTRACT.....	ix
I INTRODUCCIÓN.....	1
II. M ARCO TEÓRICO .....	3
2.1 Desarrollo forestal sustentable.....	3
2.2 Plantaciones Forestales Comerciales .....	3
2.2.1 Situación de las plantaciones forestales en el mundo .....	4
2.2.2 Situación de las plantaciones forestales en México.....	4
2.3 <i>Cedrela odorata</i> L.....	6
2.3.1 Descripción botánica .....	7
2.3.2 Distribución.....	7
2.3.3 Usos Tradicionales .....	8
2.3.4 Manejo.....	8
2.4 Residuos .....	9
2.4.1 Residuos Forestales .....	9
2.4.2 Beneficios de la disposición en el bosque .....	10
2.4.3 Problemática de la disposición en el bosque.....	10
2.4.4 Aprovechamiento de residuos forestales.....	11
2.5 Biomasa lignocelulosica.....	11
2.6 Compuestos fenólicos .....	12

2.6.1 Los fenoles como compuestos antioxidantes .....	13
2.7 Compostaje de residuos.....	14
2.7.1 Fases del compostaje.....	15
2.7.2 Factores que afectan el desarrollo del proceso .....	16
2.7.3 Madurez de la composta .....	17
III. JUSTIFICACIÓN.....	19
IV OBJETIVOS .....	21
4.1 Objetivo General .....	21
4.1.1 Objetivos Específicos .....	21
V.- HIPÓTESIS .....	22
VI.- MATERIALES Y MÉTODOS .....	23
6.1 Descripción del área de estudio .....	23
6.2 Descripción de muestras.....	24
6.3 Análisis químico .....	25
6.3.1 Determinación de Extraíbles.....	26
6.3.2 Determinación de lignina insoluble .....	26
6.3.3 Determinación de holocelulosa, celulosa y hemicelulosa .....	27
6.3.4 Azúcares totales .....	27
6.3.5 Azúcares Reductores .....	27
6.4 Cuantificación de fenoles .....	28
6.4.1. Obtención de los fenoles .....	28
6.4.2. Evaluación de Fenoles totales.....	28
6.4.3 Evaluación de la capacidad de captura de radicales libres .....	29
6.5 Obtención y evaluación de la composta.....	29
6.5.1 Parámetros evaluados durante el compostaje.....	30

6.5.2 Madurez de la composta .....	31
6.6 Análisis de resultados .....	32
VII RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	33
7.1 Determinación de extraíbles.....	33
7.2 Determinación de biomasa lignocelulosica .....	34
7.2.1 Contenido de lignina .....	34
7.2.2 Contenido de holocelulosa, celulosa y hemicelulosa.....	36
7.3 Contenido de azúcares totales y reductores .....	38
7.4 Análisis por sitio de colecta .....	39
7.4 Contenido de Fenoles Totales .....	41
7.4.1 Evaluación de la capacidad de captura de radicales libres .....	43
7.5 Parámetros evaluados durante el proceso de composteo .....	46
7.6 Madurez de la composta .....	51
7.7 Propuesta de gestión .....	54
VIII CONCLUSIONES.....	59
IX RECOMENDACIONES .....	60
X BIBLIOGRAFÍA .....	61
ANEXOS.....	69

## GLOSARIO

**Actividades silvícolas:** son las relacionadas con el cultivo de los bosques o montes, así como la conservación, restauración, fomento y aprovechamiento de la vegetación de los mismos y la primera enajenación de sus productos, que no hayan sido objeto de transformación industrial.

**Biomasa:** Es todo material de origen biológico excluyendo aquellos que han sido englobados en formaciones geológicas sufriendo un proceso de mineralización.

**Compostaje:** Tecnología utilizada para la obtención de composta, a partir de desechos orgánicos vegetales y animales, utilizando un proceso de tipo microbiológico y bioquímico, basados en mineralización, transformación y estabilización bajo condiciones aeróbicas o anaeróbicas termofílicas, bajo condiciones adecuadas de humedad y temperatura.

**Deforestación:** Proceso provocado generalmente por la acción humana, en la que se destruye la superficie forestal.

**Ecosistemas forestales:** Es el conjunto funcional de recursos como fauna, flora, suelo, recursos hídricos y su interacción entre sí y con el ambiente, en un espacio y tiempo determinados.

**Fitotoxicidad:** Capacidad de una sustancia para causar daño a las plantas.

**Metabolitos secundarios:** Síntesis de una amplia variedad de moléculas orgánicas que no parecen tener una función directa en procesos fotosintéticos, respiratorios, asimilación de nutrientes, transporte de solutos o síntesis de proteínas, carbohidratos o lípidos.

**Plantación forestal:** Cubierta vegetal artificial establecida donde previamente había o no bosque, pueden ser maderable y no maderable

**Residuo forestal:** Materiales que se desprenden de aprovechamientos madereros y que no son extraídos por no ser convertibles en subproductos

**Radicales libres:** son moléculas inestables y altamente reactivas, que remueven el electrón que les hace falta de las moléculas que están a su alrededor para obtener su estabilidad. La molécula atacada se convierte entonces en un radical libre y de esta manera se inicia una reacción en cadena que dañará muchas células y puede ser indefinida si los antioxidantes no intervienen.

**Selección disgénica:** Aprovechamiento de los mejores individuos causando la degeneración en la descendencia.

## LISTA DE ACRÓNIMOS

<b>ARL</b>	Anti radicales libres.
<b>BHA</b>	Butilhidroxianiso
<b>BHT</b>	Butilhidroxitolueno.
<b>CITES</b>	Convención sobre el comercio internacional de especies amenazadas de fauna y flora silvestre.
<b>CE</b>	Conductividad eléctrica.
<b>CONAFOR</b>	Comisión nacional forestal.
<b>CRR</b>	Crecimiento relativo de la raíz.
<b>DNS</b>	Ácido dinitrosalicílico
<b>DPPH</b>	Diphenyl picrylhidrazyl.
<b>FAO</b>	Food and agriculture organization of the United Nations.
<b>IG</b>	Índice de germinación.

<b>INIFAP</b>	Instituto nacional de investigaciones forestales, agrícolas y pecuarias.
<b>IUCN</b>	Unión internacional para la conservación de la naturaleza.
<b>LSD</b>	Least significant difference.
<b>NTEA</b>	Norma técnica estatal ambiental.
<b>OMS</b>	Organización Mundial de la Salud.
<b>PEF</b>	Programa estratégico forestal para México.
<b>PFC</b>	Plantaciones forestales comerciales.
<b>PGR</b>	Porcentaje de germinación relativo.
<b>SEMARNAT</b>	Secretaría del Medio ambiente y Recursos Naturales.
<b>M.O</b>	Materia orgánica

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Descripción de muestras de <i>Cedrela odorata</i> recolectadas.....	24
<b>Tabla 2.</b> Formulaciones usadas para la composta; cuya combinación resultó en 6 tratamientos (3x2). .....	30
<b>Tabla 3.</b> Porcentajes totales de extraíbles en cada una de las muestras .....	34
<b>Tabla 4.</b> Porcentaje de ligninas en referencia a la edad y procedencia de los residuos de cedro rojo.....	35
<b>Tabla 5.</b> Porcentajes promedio y desviación estándar para celulosa, hemicelulosa y holocelulosa.....	37
<b>Tabla 6.</b> Biomasa lignocelulosica para dos especies con alto potencial para la producción de bioetanol en comparación con <i>Cedrela odorata</i> .....	38
<b>Tabla 7.</b> Porcentaje de sólidos para los extractos etanólico y acuoso.....	42
<b>Tabla 8.</b> Porcentajes promedio y desviación estándar de la capacidad de captura de radicales libres en los estándares de referencia. ....	43
<b>Tabla 9.</b> Porcentaje promedio y desviación estándar de la capacidad de captura de radicales libres en extractos etanólicos.....	44
<b>Tabla 10.</b> Porcentaje promedio y desviación estándar de la capacidad de captura de radicales libres en extractos acuosos.....	44
<b>Tabla 11.</b> Valores iniciales y finales de pH en los diferentes tratamientos.....	47
<b>Tabla 12.</b> Valores iniciales y finales de la conductividad eléctrica en los diferentes tratamientos.....	49
<b>Tabla 13.</b> Valores iniciales y finales de materia orgánica y su reducción durante el compostaje de los residuos.....	51
<b>Tabla 14.</b> Relación C/N al final del proceso de composteo.....	52
<b>Tabla 15.</b> Índice y porcentaje de germinación al final del proceso de composteo	53
<b>Tabla 16.</b> Comparación de la biomasa lignocelulosica entre <i>Cedrela odorata</i> y valores de referencia.....	54

<b>Tabla 17.</b> Parámetros de la composta de residuos de cedro rojo en comparación con valores de referencia. ....	56
<b>Tabla 18.</b> Características químicas y físicas del suelo donde se encuentran sembrados los árboles de cedro rojo. ....	58

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Proporción de superficie plantada con especies maderables por estado (CONAFOR, 2010) .....	5
<b>Figura 2.</b> Proporción de las principales especies maderables plantadas en México. ....	6
<b>Figura 3.</b> Mapa de ubicación de los sitios de colecta del material vegetal. ....	23
<b>Figura 4.</b> Diagrama de flujo del proceso experimental .....	25
<b>Figura 5.</b> Porcentajes de extraíbles para los tres solventes usados y el total.....	33
<b>Figura 6.</b> Contenido de holocelulosa, hemicelulosa y celulosa de los residuos de cedro rojo. ....	36
<b>Figura 7.</b> Contenido de azúcares totales y reductores de los residuos. ....	39
<b>Figura 8.</b> Análisis por sitio y tipo de material, donde se muestran las diferencias estadísticas encontradas de los ensayos realizados.....	40
<b>Figura 9.</b> Rendimiento de extracción con etanol 70% y agua destilada. ....	41
<b>Figura 10.</b> Fenoles totales expresados como mg EAG/ 100 mg de extracto.....	43
<b>Figura 11.</b> Captura de radicales libres en estándares .....	44
<b>Figura 12.</b> Captura de radicales libres en extractos etanólicos .....	45
<b>Figura 13.</b> Captura de radicales libres en extractos acuosos. ....	45
<b>Figura 14.</b> Evolución del pH durante el proceso de composteo.....	47
<b>Figura 15.</b> Evolución de la conductividad eléctrica el composteo.....	49
<b>Figura 16.</b> Evolución de la materia orgánica en el composteo .....	50
<b>Figura 17.</b> Comparación física entre árboles de cedro rojo .....	57

## RESUMEN

Se realizó la caracterización química de residuos de *Cedrela odorata* L. en plantaciones forestales comerciales de dos procedencias: El Palmar, Veracruz con plantaciones de 8 y 18 años y Bacalar, Quintana Roo, en plantaciones de 9 y 10 años. Los materiales evaluados fueron hojas, ramas y aserrín a los que se les determinó biomasa lignocelulósica (lignina, celulosa, hemicelulosa), azúcares totales y reductores, fenoles y capacidad antioxidante (ARL), así como la formulación de compostas para tratar los residuos generados de las extracciones; con la información se planteó una propuesta de gestión para el aprovechamiento de los residuos. Como resultados se encontraron altas concentraciones de extraíbles totales en las hojas (37%), superiores a las encontradas en ramas (6%) y aserrín (5%), con diferencias estadísticas ( $p < 0.05$ ) en hojas con respecto a ramas y aserrín. Las ramas y el aserrín presentaron altos valores de holocelulosa 73% y bajos contenidos de ligninas 32%. El contenido de fenoles totales expresados como mg EAG/100mg de extracto, fue de 14 en hojas, 52 en ramas y 53 en aserrín, los extractos etanólicos fueron superiores a los acuosos y presentaron una mayor capacidad atrapadora de radicales libres con valores máximos de 90% para ramas, 86% en aserrín, actividades similares a los mostrados por los estándares catequina y rutina. En hojas se obtuvo un máximo de 51%. Las compostas obtenidas cumplen con los parámetros de calidad (pH, M.O, relación C/N) establecidos por la norma NTEA-006-SMA-RS-2006 en el caso de hojas y están dentro de los valores que establece la Organización Mundial de la Salud. De manera preliminar se propone que el material lignocelulósico de ramas y aserrín pueda ser utilizado para la producción de bioenergéticos y que la composta obtenida de las hojas pueda aplicarse para mejorar las propiedades del suelo.

**Palabras clave:** residuos de cedro rojo, biomasa lignocelulósica, fenoles, actividad antioxidante, composta.

## ABSTRACT

The Chemical characterization of *Cedrela odorata* L. residues (leaves, wood of branches and sawdust) in commercial forest plantations (El Palmar, Veracruz plantations of 8 and 18 years old and Bacalar, Quintana Roo plantation of 9 and 10 years old) were evaluated. Lignocellulosic biomass (lignin, cellulose, hemicellulose), total and reducing sugars, phenols and antioxidant capacity (ARL) and the formulation of compost from residuals material were investigate. A management proposal for the use of waste was raised. High concentrations of total extractable in leaves (37%), higher than those found in branches (6%) and sawdust (5%), with statistically significant differences ( $p < 0.05$ ) in leaves compared to branches and sawdust were found. The branches and sawdust showed high holocelulosa 73% and low lignin content 32%. The content of total phenols expressed as mg EAG / 100 mg of extract was 14.0 in leaves, 52.0 in branches and 53 in sawdust, the ethanol extracts were higher than the aqueous, and had a higher scavenger capacity of free radicals with maximum values in branches, of 90%, sawdust 86%, similar to those shown by catechin and rutine standards activities. In leaves a maximum of 51% phenols was obtained. The quality of the compost obtained is according with parameters established by the NTEA-006-SMA-RS-2006 standard (pH, OM, C/N) in leaves and within the values established by the World Health Organization. Preliminarily proposed that the branches lignocellulosic material and sawdust can be used for the production of biofuel and the compost obtained from the leaves can be applied to improve the soil properties.

**Keywords:** red cedar residues, lignocellulosic biomass, phenols, antioxidant activity, compost.

## I INTRODUCCIÓN

El cedro rojo es uno de los pilares en la producción forestal en México (CONAFOR, 2010), su alto valor comercial ha provocado su disminución en ambientes naturales, es considerada como especie en protección por: la NOM-059-SEMARNAT-2010, por la convención sobre el comercio internacional de especies amenazadas de fauna y flora silvestre (CITES) y por la unión internacional para la conservación de la naturaleza (IUCN) que la considera vulnerable en su lista roja (SEMARNAT, 2010; CITES, 2010; IUCN, 2011).

Para aprovechar las propiedades y tratar de mitigar la explotación del cedro rojo se han implementado plantaciones forestales comerciales con la finalidad de recuperarla. Como resultado de su explotación se generan residuos procedentes de podas, de la selección de rebrotes y de las cortas finales.

Dichos residuos están formados químicamente por celulosa, lignina y por sustancias extraíbles como terpenos, fenoles, azúcares, grasas y ceras. Esta composición dependerá de la edad, especie y ubicación de las plantaciones (Rosales y González, 2003; Rosales *et al* 2009).

Los tratamientos más comunes para los residuos forestales son la quema controlada o el amontonamiento del material en el monte, aunque la mayoría de las veces este material se dispersa en la zona de corte debido al costo adicional que su tratamiento conlleva. Como consecuencia se ejerce un impacto en el paisaje y por ende sobre la fauna de la zona, la cual ve limitada su movilidad, además de que estos residuos suponen una fuente de parásitos y plagas (Sztern y Pravia, 1999; Corral, 2011).

Además el abandono de los residuos en el monte representa un alto impacto ambiental por la gran cantidad de material combustible de lenta descomposición que acarrea un alto riesgo de incendios lo cual trae como consecuencia la pérdida total de la materia orgánica y de los nutrientes que ésta contiene y aunque el fósforo y potasio son conservados en su mayor parte, el nitrógeno que es el

principal nutriente se pierde casi en su totalidad (Goya, *et al.*, 2003; Velázquez, 2006; Fernández, 2002).

Los residuos forestales son materiales susceptibles de ser utilizados de una forma ecológica y económica en la producción energética, por ejemplo la producción de combustibles renovables como etanol y de innumerables productos de alta demanda social para varios sectores, como la industria farmacéutica, química, cosmética y el sector agrícola. (Ramírez, 2010; Rebottaro, *et al.*, 2010; Lima, 2012).

Por lo que conocer la composición química de los residuos forestales de cedro rojo es importante para encontrar alternativas para su aprovechamiento, y con ello reducir los aspectos adversos de su disposición y darles un valor agregado.

## **II. MARCO TEÓRICO**

### **2.1 Desarrollo forestal sustentable**

El desarrollo forestal sustentable es una prioridad en el mediano y largo plazo, así lo establece el programa estratégico forestal para México 2025 (PEF 2025), el éxito radicarán en la aplicación y ejecución de las estrategias y líneas de acción contempladas; en este programa se destaca la importancia de las plantaciones forestales comerciales (PFC) para aumentar la producción maderable para el abastecimiento de la industria forestal, reducir la presión sobre los bosques naturales, fomentar la inversión privada y social en el sector forestal, y convertir áreas degradadas o improductivas en bosques productivos, contribuyendo de paso al mejoramiento del ambiente en general (CONAFOR, 2010).

Las plantaciones forestales son de suma importancia en la solución del problema de la deforestación y disminución de bienes y servicios derivados del bosque, debido a que contribuye a la restauración de áreas deterioradas. (López y Musálem, 2007).

### **2.2 Plantaciones Forestales Comerciales**

Se le denomina plantación forestal a la cubierta vegetal artificial establecida donde previamente había o no bosque, pero se establecen especies diferentes a las nativas que originalmente existieron y basada en el conocimiento silvícola (CONFOR, 2010; CONFOR, 2012).

Las plantaciones forestales pueden ser maderable y no maderable, dentro de la maderable se encuentra la que tiene orientación para la producción de madera para celulosa y para la industria forestal mecánica, con un incremento anual mínimo de 12 a 15 m<sup>3</sup> de madera por hectárea mientras que las no maderables se destinan para la obtención de productos como leña y carbón vegetal (CONAFOR, 2010; Velázquez, 2010).

### **2.2.1 Situación de las plantaciones forestales en el mundo**

La superficie total de bosques a nivel mundial es de aproximadamente 3,869 millones de hectáreas, de los cuales solo 187 millones son de plantaciones forestales, lo que representa el 4.8% del total de la superficie forestal mundial, siendo Asia donde se concentra el mayor porcentaje de plantaciones forestales con el 62% lo que representa 116 millones de hectáreas, seguida por Europa con 17% que representa 32 millones de hectáreas y América del Norte y Central con un 9%.

Según la FAO, 2005 el 80% de las plantaciones forestales a nivel mundial se concentran en 10 países, de los cuales China ocupa el primer lugar en superficie plantada con más de 45 millones de hectáreas, seguido por la India con aproximadamente 32 millones de hectáreas, la Federación Rusa con 17 millones y Estados Unidos con 16 millones de hectáreas.

Los géneros que más se plantan a nivel mundial son el *Pinus* con el 20%, *Eucalyptus* con 10%, *Hevea* con 5%, *Acacia* con 4% y *Tectona* con el 3%, otras Latifoliadas en conjunto ocupan el 18% y las coníferas diferentes al género *Pinus* ocupan el 11% (CONAFOR, 2010; Velázquez, 2010).

### **2.2.2 Situación de las plantaciones forestales en México**

La superficie cubierta por plantaciones forestales a nivel nacional es de aproximadamente 117,479 hectáreas de las cuales las especies maderables cubren un 85% que representa 100,131 hectáreas, las especies no maderables cubren el 14.8% que representa 17,348 hectáreas, siendo el estado de Veracruz, Tabasco y Campeche los que mayor superficie plantada de especies maderables reportan, como se muestra en la figura 1.

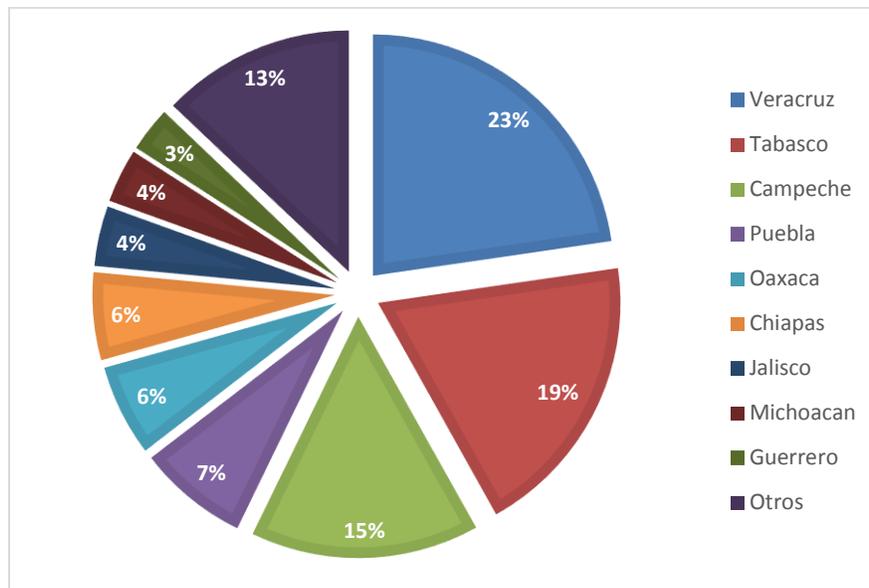


Figura 1. Proporción de superficie plantada con especies maderables por estado (CONAFOR, 2010).

Por otro lado el estado de Coahuila tiene una superficie no maderable de 9,380 hectáreas de un total de 17,348 lo que representa casi un 55% de toda la superficie no maderable, seguido por San Luis Potosí con un 18.2% lo que representa 3,160 hectáreas.

Las especies maderables más plantadas a nivel nacional son: los géneros *Eucalyptus* y *Pinus* que en conjunto con *Cedrela odorata* cubren una superficie mayor al 55% de la superficie total plantada, como se puede ver en la figura 2.

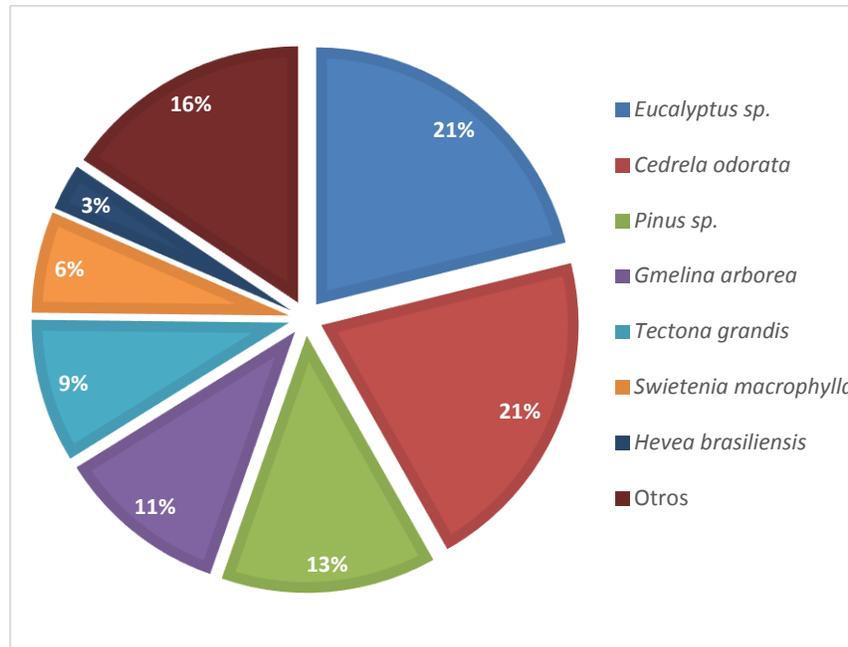


Figura 2. Proporción de las principales especies maderables plantadas en México.

Dentro de la superficie por especie se distinguen dos grupos: las tropicales que cubren un 83% del total de la superficie plantada y las templadas con el 17%; dentro de las tropicales se encuentran los géneros *Cedrela*, *Swietenia*, *Eucalyptus*, *Tectona* y *Gmelina*, dentro de los dos primeros géneros se incluyen el cedro rojo y la caoba respectivamente las cuales son las dos especies nativas más importantes de México por su alto valor en el mercado (Velázquez, 2010; CONAFOR, 2010).

### 2.3 *Cedrela odorata* L.

Especie forestal característica de las regiones tropicales perteneciente a la familia Meliaceae, es una de las especies de mayor valor económico ya que se le considera una madera preciosa, utilizada principalmente para la fabricación de muebles de calidad. Al igual que la caoba son los pilares de la producción forestal en México, la madera proveniente de este árbol es fácil de trabajar y resistente a la pudrición y a las termitas, tiene un olor o fragancia característica. Debido a su valor económico, ha sido severamente afectada por la selección disgénica y la

deforestación, al fragmentar y disminuir sus poblaciones naturales (Sánchez *et al.*, 2003; Velázquez, 2010; Martínez-Vento *et al.*, 2010).

Es por esto que el cedro rojo está protegido por varias organizaciones como:

NOM-059-SEMARNAT-2010 como especie en protección especial (SEMARNAT, 2010).

CITES (Convención sobre el comercio internacional de especies amenazadas de fauna y flora silvestre) apéndice III para los países de Bolivia, Colombia, Guatemala y Perú (CITES, 2010).

IUCN (2011) (unión internacional para la conservación de la naturaleza) considera a *Cedrela odorata* vulnerable en su lista roja.

### **2.3.1 Descripción botánica**

Árbol caducifolio de hasta 35 m de altura y de 1.5 a 2.0 m de diámetro normal, con un tronco derecho o poco ramificado y con pequeños contrafuertes en la base, su copa es redondeada y densa, de corteza color café grisáceo o rojizo posee olor a ajo y sabor amargo, de follaje vistoso. Sus hojas tienen apariencia de pluma, son de color verde oscuro en el anverso y verde pálido o amarillento en el reverso presentan un olor penetrante a ajo cuando se estrujan. Sus flores son masculinas y femeninas están suavemente perfumadas y son de color blanco verdoso. Sus frutos son unas capsulas leñosas agrupadas que en estado inmaduro poseen un color verde y al madurar se torna café oscuro y se ven doblados, tiene alrededor de 30 semillas aladas (Márquez y Lora, 1999; Morales y Herrera, 2009; Velázquez, 2010).

### **2.3.2 Distribución**

En el continente americano se distribuye desde el norte de México hasta el norte de Argentina, incluidas las islas de Caribe (Morales y Herrera, 2009), en México el cedro rojo se distribuye principalmente en los estados de Sinaloa, Nayarit, Colima, Jalisco, Guerrero, Veracruz, Tabasco, Campeche, Chiapas, Yucatán, Quintana

Roo, Oaxaca, Morelos, Puebla, Hidalgo, sur de Tamaulipas y San Luis Potosí (Márquez y Lora, 1999; Morales y Herrera, 2009).

### **2.3.3 Usos Tradicionales**

Desde tiempos antiguos los mayas y los primeros colonizadores utilizaron la madera de este árbol para la fabricación de canoas y casas ya que esta madera no es atacada por la polilla ni por las termitas, es utilizada para la fabricación de muebles de lujo, chapa plano decorativas, gabinetes de primera clase, ebanistería, puertas y ventanas, contrachapados, molduras y paneles, palillos y cajas de fósforos, producción de pulpa para papel, entre otros (Morales y Herrera, 2009). El principal uso que le dan las personas al cedro rojo es medicinal del cual utilizan las hojas, la corteza y la madera, mediante infusiones en el tratamiento de cólicos estomacales, problemas respiratorios, diarrea, reumatismo, dolores de muelas, heridas, fiebre y hemorragia vaginal. Las semillas tienen propiedades vermífugas (Márquez y Lora, 1999).

### **2.3.4 Manejo**

El cedro rojo es atacado principalmente por el barrenador de brotes *Hypsipyla grandella* Zeller cuyo daño principal es la perforación de los brotes nuevos especialmente el brote principal el cual se bifurca, impidiendo la formación de fustes rectos lo que disminuye el valor comercial del árbol, si los ataques son repetidos en las plántulas o arboles jóvenes pueden causar la muerte.

La época de lluvias es en la que se registran un mayor número de ataques, el árbol es más susceptible durante los primeros 2 y 3 años después de su plantación. En arboles de mayor edad los ataques disminuyen ya que los sitios de ovoposición se encuentran dispersos. Es por esto que son de suma importancia las labores de limpieza durante los 2 primeros años. En caso de que se presente un ataque se debe podar la parte dañada y cuando empiezan los rebrotes se hace la selección del mejor rebrote y los demás se podan, evitando la formación de bifurcaciones en el fuste del árbol que es la parte más importante desde el punto de vista maderable, este procedimiento se repite las veces que sea necesario con

la finalidad de lograr un fuste recto. Como el árbol en plantaciones forestales se encuentra en espacios amplios no se requiere un intenso régimen de aclareos. Con el avance del turno se eliminan árboles de mala forma con el objetivo de dejar una densidad de 100-200 árboles por hectárea en la corta final (Ramírez *et al.*, 2008; Morales y Herrera, 2009; Martínez-Vento *et a.*, 2010).

## **2.4 Residuos**

Son todos aquellos materiales generados en las actividades de producción y consumo que no han alcanzado en el proceso de producción ningún valor económico, estos desechos son el resultado del uso ineficiente de los recursos en la producción de bienes y servicios demandados por la sociedad. A falta de la tecnología adecuada no se pueden aprovechar o simplemente no existe un mercado para estos subproductos (Sztern y Pravia, 1999).

Los residuos también se definen como aquellas partes sobrantes de un proceso de producción luego de sufrir una transformación ya sea natural o artificial que puede modificar o no sus características fisicoquímicas y estructurales iniciales (Corral, 2011).

Los residuos orgánicos son todos aquellos que provienen de seres vivos ya sean animales o vegetales, dentro de estos se incluyen una gran diversidad de residuos que se originan naturalmente durante el ciclo vital, producto de las funciones fisiológicas de mantenimiento y perpetuación o como producto de la explotación del hombre hacia estos recursos (Sztern y Pravia, 1999).

### **2.4.1 Residuos Forestales**

Se define como residuos forestales aquellos materiales que se desprenden de aprovechamientos madereros y que no son extraídos por no ser convertibles en subproductos. Los residuos generados de aprovechamientos forestales pueden tener su origen en actividades silvícolas tales como: claras y aclareos, podas, selección de rebrotes, industrialización (aserrín, costeras, etc.), entre otras, aunque la mayoría de estos desechos procede de las cortas finales en donde este

material está compuesto principalmente de ramas, despuntes, hojas y acículas, que presentan diferente calidad, tasa de degradación y potencial de utilización. La cantidad de residuos generados depende de factores como la homogeneidad de los árboles y la especie (Velázquez, 2006; Fernández, 2002; Rebottaro *et al.*, 2010).

Estos desechos orgánicos están formados químicamente por celulosa, lignina y por sustancias extraíbles formadas en el metabolismo secundario de las plantas constituidos por terpenos, fenoles, azúcares, grasas y ceras. Esta composición dependerá de la edad, especie y ubicación de éstos residuos (Rosales y González, 2003).

#### **2.4.2 Beneficios de la disposición en el bosque**

Los residuos forestales desempeñan un papel importante en la ecología y protección de ecosistemas forestales, ya que mantienen la fertilidad y protección del suelo, son reservorio de carbono y nutrientes, sirven de sustrato para procesos biológicos. El contenido de materia orgánica y su estructura ayudan a controlar la erosión, sedimentación e inundaciones, aunado a esto la materia orgánica mejora la estructura del suelo, incrementa la capacidad de cambio catiónico y estabiliza la proporción de nitrógeno en la mineralización (Ramírez, 2010; Rebottaro *et al.*, 2010).

#### **2.4.3 Problemática de la disposición en el bosque**

Los tratamientos más comunes para los residuos forestales son la quema controlada o el amontonamiento del material en el monte, aunque la mayoría de las veces este material queda disperso en la zona de corte debido al costo adicional que su tratamiento conlleva. Al momento de realizar una regeneración artificial los residuos estorban por lo que se tiene que hacer un desbroce o trituración *in situ* para facilitar las labores de plantación. Por otra parte, se ejerce un impacto paisajístico visual y sobre la fauna de la zona, que ve limitada su movilidad, además estos residuos suponen una fuente de parásitos y plagas. El abandono de los residuos en la superficie del monte representa un alto impacto

ambiental debido principalmente al elevado volumen de biomasa combustible de lenta descomposición que acarrea un alto riesgo de incendios lo que trae como consecuencia la pérdida total de la materia orgánica y de los nutrientes que ésta contiene y aunque el fósforo y potasio son conservados en su mayor parte, el nitrógeno que es el principal nutriente se pierde casi en su totalidad (Sztern y Pravia, 1999; Fernández, 2002; Goya *et al.*, 2003; Velázquez, 2006; Corral, 2011).

Muchas veces los residuos se acomodan siguiendo las curvas de nivel o perpendicular a ellas, otras veces se distribuyen homogéneamente para cubrir todo el terreno, sin embargo esto afectará el crecimiento inicial de las plantaciones ya que afecta significativamente la actividad de las raíces en los procesos de absorción, y también las tasas de infiltración de agua y de erosión se ven afectadas (Vergara, 2004).

#### **2.4.4 Aprovechamiento de residuos forestales**

Los residuos forestales son materiales susceptibles de ser utilizados de una forma ecológica y económica en la producción energética, por ejemplo la producción de combustibles renovables como etanol y de innumerables productos de alta demanda social para varios sectores, como la industria farmacéutica, química, cosmética y el sector agrícola (Ramírez, 2010; Rebottaro *et al.*, 2010; Lima, 2012).

Los residuos forestales de la tala de árboles representan una fuente de biomasa aprovechable para la obtención de aceites esenciales, ceras, extractos vegetales y forrajes, así como en la elaboración de composta para el mejoramiento del suelo.

#### **2.5 Biomasa lignocelulósica**

La biomasa lignocelulósica está compuesta principalmente por tres constituyentes poliméricos: la celulosa, hemicelulosa y lignina, los cuales están asociados y sirven de soporte estructural a la pared celular (Guarnizo *et al.*, 2009; Alvares *et al.*, 2013).

La celulosa está formada por unidades de glucosa y junto con la hemicelulosa forman los polisacáridos de la madera llamados holocelulosa que es una fuente de

energía renovable por naturaleza. La lignina por su parte es una macromolécula cuyos monómeros son de naturaleza aromática, es resistente al ataque de microorganismos anaerobios y su función es proteger las cadenas de celulosa y hemicelulosa (López *et al.*, 2008).

La madera se encuentra entre los materiales lignocelulosicos con mayor disponibilidad en el mundo, por lo que en los últimos años se han buscado alternativas para la gestión y aprovechamiento integral de los residuos lignocelulosicos derivados de las actividades forestales: obtención de fibras de carbón a partir de la lignina, Obtención de *whiskers* de celulosa a partir de la celulosa, obtención de bioetanol partir de la celulosa y hemicelulosa, y desarrollo de biomateriales (Monteiro, 2010; Álvarez-Castillo *et al.*, 2012).

Ante el declive de las fuentes de combustibles fósiles los materiales lignocelulosicos son reconocidos como la mayor fuente de energía renovable en el mundo que proporciona alternativas de combustibles para el transporte como el bioetanol, biobutanol o biodiesel en el corto plazo (Hamelinck *et al.*, 2005; Gómez *et al.*, 2012; López *et al.*, 2008).

## **2.6 Compuestos fenólicos**

Como parte de su metabolismo secundario, las plantas producen una gran variedad de compuestos químicos entre los que se encuentran los compuestos fenólicos. Estos se caracterizan por contener en su estructura un anillo aromático con un grupo funcional hidroxilo en el anillo. Por su amplia diversidad química tienen funciones muy diversas en las plantas, muchos tienen papeles en la defensa de las plantas contra herbívoros o patógenos, otros participan en el soporte mecánico, en la atracción de polinizadores y dispersantes de frutos, reducción del crecimiento de las plantas competidoras próximas; algunos de estos compuestos son solubles solo en solventes orgánicos, otros son ácidos carboxílicos y glucosídicos solubles en agua, mientras otros como los taninos son grandes polímeros muy insolubles (Taiz y Zeiger, 2006).

Estos compuestos son considerados de gran importancia económica debido a que son ampliamente utilizados en la fabricación de adhesivos, colorantes, herbicidas, etc. Presentan también actividad inhibitoria del crecimiento de plantas y bacterias fijadoras de nitrógeno y nitrificantes del suelo. (Corral, 2011). En áreas biológicas, los fenoles son reconocidos por su uso potencial en la prevención y tratamiento de enfermedades crónico-degenerativas y son ampliamente conocidas sus propiedades antioxidantes, antimutagénicas, antiinflamatorias, antimicrobianas y anticancerígenas, entre otras.

### **2.6.1 Los fenoles como compuestos antioxidantes**

Los compuestos antioxidantes son sustancias que estando presentes a baja concentración con respecto a una molécula oxidable, retardan o previenen la oxidación de este sustrato, estos compuestos químicos tienen la capacidad de inhibir a los radicales libres en el organismo o impedir su formación, reaccionando con éstos para formar compuestos estables no reactivos, proceso conocido como atrapamiento de radicales libres. Diversos tipos de frutos, hojas, cereales, raíces y cortezas son fuente de antioxidantes, en la mayoría de ellos la propiedad antioxidante la confieren los fenoles, en diversas formas, fenoles simples, flavonoides y/o taninos. Además de las propiedades antioxidantes los fenoles poseen propiedades antibacterianas, antivirales y antifúngicas (Rosales *et al.*, 2006).

El metabolismo oxidativo es primordial en el funcionamiento celular, sin embargo es perjudicial cuando los radicales libres generados durante el proceso no son inactivadas mediante sistemas de defensa enzimático como catalasa, glutatión peroxidasa, superóxido dismutasa o por la acción de antioxidantes como vitamina C, vitamina E, beta-caroteno, glutatión reducido, albúmina, flavonoides (Ramos *et al.*, 2008; Jiménez *et al.*, 2005). Los radicales libres generan cambios oxidativos en las biomoléculas generando diversas patologías como aterosclerosis, cáncer, envejecimiento, diabetes, inflamación y enfermedades degenerativas, lo que ha llevado al uso de antioxidantes sintéticos como el ácido ascórbico, butilhidroxitolueno (BHT) y butilhidroxianisol (BHA) que se utilizan comercialmente

en la industria alimentaria y farmacéutica los cuales se ha puesto en duda ya que su uso presenta implicaciones de tipo tóxico y cancerígeno. Lo que ha inclinado la tendencia a la búsqueda y uso de antioxidantes de fuentes naturales.

Existen diversos métodos por medio de los cuales se puede determinar la actividad antioxidante, basados en la capacidad para captar radicales libres entre ellos se encuentra el uso del método DPPH (2,2-Difenil-1-picryl hidrazil) el cual consiste en que este radical tiene un electrón desapareado de color azul-violeta, que en presencia de una sustancia antioxidante reacciona decolorándose a amarillo pálido, midiéndose por espectrofotometría a 517nm. Calculándose el porcentaje de captación de radicales libres por diferencia de absorbancias (Jiménez *et al.*, 2005; Rosales *et al.*, 2006; Ramos *et al.*, 2008).

## **2.7 Compostaje de residuos**

El compostaje es un proceso de descomposición de la materia orgánica mediante la acción biológica controlada de una población mixta de microorganismos en un ambiente aerobio. Los desechos son amontonados en pilas de manera tal que el calor generado sea conservado, como resultado la temperatura de la pila sube acelerando el proceso de degradación natural, lo que da origen a un producto denominado composta, el cual se utiliza en la agricultura para mejorar la textura y estructura de los suelos así como la retención de agua y adición nutrientes (Dalzell *et al.*, 1991; Corral, 2011).

Algunos desechos orgánicos pueden disponerse de manera directa en el suelo sin embargo algunos residuos contienen patógenos de origen animal o vegetal que pueden causar enfermedades, impedir la germinación de las semillas o el crecimiento de las plantas por lo que al someter estos residuos a compostaje se logra su esterilización por la acción de la temperatura que se alcanza en el proceso logrando la eliminación de patógenos, malas hierbas y semillas por lo que estos problemas no son trasladados a los cultivos, además las mezclas de desechos orgánicos en el compostaje propicia una descomposición más rápida en las pilas (Dalzell *et al.*, 1991; Avendaño, 2003).

El proceso de composteo es poco contaminante, poco complejo, económicamente viable y de gran aceptación social que permite de forma controlada la degradación de los residuos orgánicos para su posterior integración al suelo (Sztern y Pravia, 1999).

### **2.7.1 Fases del compostaje**

Los residuos pasan por cuatro diferentes fases durante el compostaje, la mesofílica, termofílica, maduración y estabilización, las cuales dependen de la actividad metabólica de los microorganismos.

La fase mesofílica comienza cuando los materiales se acumulan en pilas, e inmediatamente comienza la descomposición de la materia mediante la autólisis de los tejidos, lo que conlleva al crecimiento de la población microbiana, principalmente hongos y bacterias mesofílicas que transforman los residuos orgánicos en formas estables, lo que origina un aumento de la temperatura hasta 40°C aproximadamente, aunado a esto el pH disminuye debido a la descomposición de lípidos y glúcidos en ácidos orgánicos y proteínas en aminoácidos.

En la fase termofílica la temperatura continua subiendo hasta 75°C lo que lleva a la esterilización de los residuos debido a la alta temperatura, en esta fase las poblaciones mesofílicas mueren o permanecen latentes mientras las bacterias, actinomicetos y hongos termofílicos continúan con la fermentación, propiciando la hidrólisis transformando sustancias tales como grasas y el ataque superficial a lignina y celulosa.

Posteriormente la temperatura desciende hasta alcanzar la temperatura ambiente como respuesta a la disminución de nutrientes y energía, provocando la muerte de microorganismos termofílicos y la aparición de los mesofílicos, llevándose a cabo la maduración de la composta al degradarse los compuestos resistentes así como la formación de compuestos húmicos, alcanzando su estabilización (Corral, 2011; Avendaño, 2003).

### 2.7.2 Factores que afectan el desarrollo del proceso

Durante el desarrollo del compostaje se presentan diversas condiciones cambiantes de temperatura, pH, conductividad y nutrientes, así como de las especies y el número de microorganismos. El tiempo que tardan los residuos en compostarse dependerá del contenido de humedad, aireación o mezclado, pH, tamaño de la pila y suministro de nutrientes.

**Aireación:** Es indispensable el suministro de aire a toda la pila de compostaje para suministrar oxígeno y eliminar el dióxido de carbono producido. Una mala aireación traerá como consecuencia la proliferación de microorganismos anaerobios causantes de la putrefacción del material y malos olores (Haug, 1993; Dalzell *et al.*, 1991). Un exceso de aireación provoca la eliminación de calor al evaporar la humedad lo que provoca la reducción de la actividad de los microorganismos.

**Humedad:** Para los microorganismos que participan en el compostaje los niveles adecuados de humedad son importantísimos ya que el agua es el medio de transporte de sustancias solubles que les sirven de alimento. Cuando el porcentaje de humedad está por debajo del 30% las reacciones en el compostaje de hacen lentas, por el contrario cuando esta humedad se presenta en exceso satura los espacios entre las partículas impidiendo el movimiento del aire y de los microorganismos.

La humedad optima varía entre un 40 y un 60%, aunque dependiendo de los materiales a compostar éste puede cambiar, por ejemplo los residuos forestales necesitan una mayor cantidad de agua para arrancar el proceso de composteo por lo que su requerimiento máximo de humedad va 75 a 85%, por otro lado el material vegetal fresco requiere de una humedad de 50 a 60%. En la practica el máximo contenido de humedad dependerá de la firmeza estructural en húmedo de los materiales sometidos a compostaje (Domínguez, 2010; Corral, 2011).

**Temperatura:** Parte de la energía liberada por la descomposición de material orgánico se desprende en forma de calor originando el aumento de la temperatura

en la pila de compostaje. Inicialmente los residuos se encuentran a temperatura ambiente, después ocurre un calentamiento gradual debido a la multiplicación de microorganismos que degradan moléculas orgánicas como azúcares, almidones y grasas y forman otras más sencillas. Entre 35 y 40°C se encuentra la mayor diversidad microbiana y la degradación más alta oscila entre los 45 y 50°C, la muerte de patógenos ocurre cuando el proceso supera los 53°C (Dalzell *et al.*, 1991; Barrena, 2006).

**pH:** El valor de este parámetro varía conforme el proceso de composteo avanza, el pH óptimo se encuentra entre 6.5 y 8.0, sin embargo según Dalzell *et al* (1991) la capacidad del composteo hace posible un rango de entre 5.5 y 9.0.

Al inicio del compostaje el pH disminuye por la acción de los microorganismos sobre la materia orgánica liberando ácidos orgánicos. Después hay una alcalinización del medio por la degradación de los ácidos orgánicos, y generación de amoníaco por la descomposición de proteínas. Finalmente tiende a neutralizarse al formar compuestos húmicos (Corral, 2011).

### **2.7.3 Madurez de la composta**

Para determinar la madurez de una composta existen diversos métodos, como los de observación en los cuales se evalúa que la composta no presente olor desagradable, debe tener un olor a tierra húmeda, y su color puede ir desde café oscuro a negro (Corral, 2011). Otros métodos de evaluación se mencionan a continuación.

**Relación C/N:** Esta relación es uno de los parámetros más importantes del compostaje, ya que estos elementos son esenciales para la nutrición de las plantas, determinan el grado de descomposición de los residuos y se establece en base al carbono disponible.

Un compost maduro presenta una relación C/N de 20:1 lo más cercano a 15, aunque dependiendo de la naturaleza del material puede ser superior, esto puede suceder con materiales con alto contenido de ligninas y celulosa, ya que el carbón

orgánico se encuentra en formas resistentes y no puede ser usado inmediatamente por las plantas (Domínguez, 2010).

La norma técnica estatal ambiental NTEA-006-SMA-RS-2006 establece que la relación C/N debe ser menor a 12.

**Pruebas de germinación:** El emplear compost inmaduros provoca efectos negativos en las plantas por la presencia de metabolitos fitotóxicos, que contienen altos contenidos de amonio, ácidos volátiles orgánicos, metales pesados y sales que pueden provocar inhibición de la germinación de la semilla o del crecimiento de la raíz (Varnero *et al.*, 2006).

Los bioensayos de germinación son comúnmente usados para evaluar la madurez de la composta y se basan en el efecto negativo que provoca la utilización de un compost inmaduro sobre la germinación de la semilla y el crecimiento de las plántulas por la presencia de compuestos tóxicos, así como la presencia de sustancias estimuladoras.

Existe una amplia variedad de especies de plantas usadas para evaluar la fitotoxicidad de la composta, como el berro o el rábano usados por su rápida respuesta; la cebada por el fácil manejo de su raíz y la lechuga romana que permite detectar efectos Fitotóxicos mediante la afectación de su germinación, elongación radicular y posterior crecimiento y desarrollo (Domínguez, 2010).

---

### III. JUSTIFICACIÓN

Las plantaciones forestales comerciales de cedro rojo se establecieron con la finalidad de aumentar el número de individuos de esta especie y así lograr que salga de la NOM-059-SEMARNAT-2010 ya que según los encargados de las plantaciones el estar en esta norma aumenta la tala clandestina impidiendo que la especie se recupere. Además las plantaciones restauran áreas degradadas, por lo que se debe asegurar su preservación y continuidad.

En las plantaciones de manera natural y al momento de realizar prácticas silvícolas se generan una gran cantidad de residuos, constituidos principalmente por ramas, despuntes y hojas, a los que hay que darles un tratamiento que conlleva un costo adicional, por lo que las acciones más comunes a estos productos son la quema controlada, el amontonamiento del material en el predio o simplemente la dispersión de estos residuos en la zona de corte.

La disposición ineficiente de los residuos ocasiona amontonamiento sobre la superficie del terreno que por su lenta descomposición, permanecen largo tiempo en el lugar, lo que es un impedimento para el establecimiento de la nueva siembra de plántulas, por lo que posteriormente se tiene que hacer un desbroce o trituración in situ con la finalidad de facilitar dichas tareas, aunado a esto en la época de calor los residuos sufren un secado rápido, lo que supone altos riesgos de incendios que amenazan la continuidad de la producción, afectando negativamente la economía de las familias que dependen de esta actividad, además de aumentar las emisiones de CO<sub>2</sub>.

El amontonamiento de estos residuos también ejerce un impacto paisajístico visual, limitación de la movilidad de la fauna de la zona y son una fuente de parásitos y plagas (Velázquez, 2006) que atentan contra la salud de la especie. El principal problema de estas plantaciones es la plaga *Hypsipyla grandella* que muchas veces permanece en los residuos frescos facilitando su propagación a las nuevas plántulas favoreciendo la formación de bifurcaciones y por consecuencia la disminución del valor del árbol al no tener un fuste recto. Otro residuo que causa

problemas en la industria de procesamiento de la madera es el aserrín que al no contar con datos sobre su composición no es posible manejarlo de una manera distinta al amontonamiento.

Por lo que es necesario realizar una evaluación química de los residuos forestales procedentes del aprovechamiento maderable del cedro rojo, con la finalidad de aprovechar este recurso de manera sustentable y así evitar los riesgos que conlleva su mala disposición en las plantaciones forestales comerciales.

Donde se caracterizara la biomasa lignocelulosica, el contenido de fenoles totales y su actividad antioxidante (inhibitoria de radicales libres), con un enfoque para su utilización en áreas biomédicas. Aunado a esto se evaluarán los residuos procedentes de la obtención de fenoles y de plantaciones forestales como mejoradores de suelo con la finalidad de cerrar el ciclo de generación de residuos.

Ambientalmente al aprovechar los residuos se disminuye el riesgo de incendios y por consiguiente la emisión de CO<sub>2</sub>, así como los reservorios de parásitos y plagas.

Económicamente al dar un valor agregado a los residuos se obtendrán recursos para la preservación de las plantaciones.

Socialmente se podrán generar fuentes de empleo para las personas que viven a los alrededores para la colecta y tratamiento de los residuos.

## IV OBJETIVOS

### 4.1 Objetivo General

Evaluar químicamente los subproductos de *Cedrela odorata* L. y establecer una propuesta de gestión para su aprovechamiento.

#### 4.1.1 Objetivos Específicos

- ✓ Caracterizar y evaluar químicamente los subproductos de *Cedrela odorata* de plantaciones comerciales (extraíbles totales, biomasa lignocelulósica, fenoles totales, capacidad antioxidante).
- ✓ Establecer y evaluar el proceso de compostaje como sistema alternativo de disposición de los residuos de la extracción de compuestos químicos y de las plantaciones comerciales.
- ✓ Establecer la propuesta de gestión para el aprovechamiento de residuos forestales de cedro rojo.

## V.- HIPÓTESIS

Los residuos de *Cedreia odorata* presentan altos contenidos de compuestos químicos de interés económico. Su utilización presentará alternativas de solución a la problemática de la disposición de residuos.

## VI.- MATERIALES Y MÉTODOS

Este trabajo forma parte del proyecto CONACYT-CONAFOR 2010-C01-134514, "Clones de cedro rojo tolerantes al barrenador *Hypsipyla grandella* Zeller en el golfo y sureste de México.

### 6.1 Descripción del área de estudio

El material utilizado en el presente estudio proviene de dos campos experimentales del INIFAP, Figura3:

- El Palmar en Tezonapan, Veracruz, con ubicación geográfica de 18° 32' L.N., y 96° 47' L.W.; 180 msnm, con clima en el sitio es cálido-húmedo con lluvias en verano, precipitación media de 2888 mm anuales, y temperaturas medias anuales que fluctúan de 16 a 36 °C y 24.4°C como media anual. La fisiografía general es de terrenos planos y lomeríos, con pendientes que varían de 5 a 20%.
- San Felipe Bacalar, en Othón Pompeyo Blanco, Quintana Roo con ubicación geográfica 18° 44'49.2'' L.N. y 88° 19'28.5'' ;10 msnm, de clima del sitio es cálido-subhúmedo con lluvias en verano y parte de invierno, con precipitación media de 1260 mm anuales y temperatura media anual de 25.5°C. La fisiografía general del terreno es casi plana.

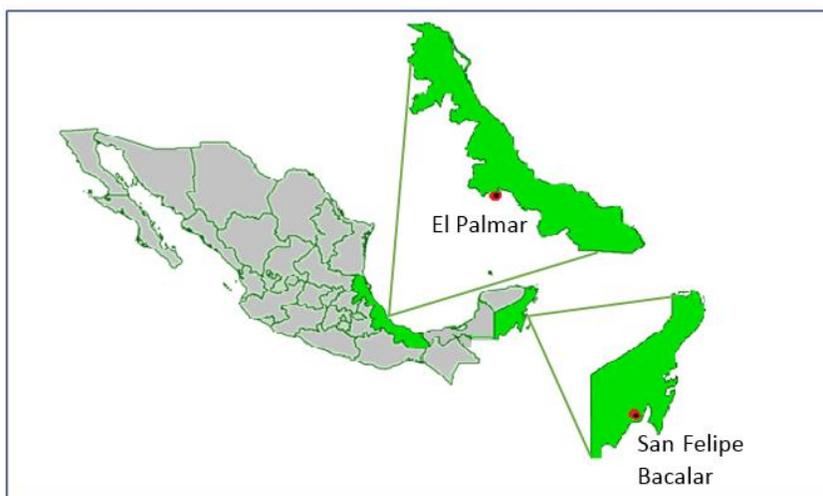


Figura 3. Mapa de ubicación de los sitios de colecta del material vegetal.

## 6.2 Descripción de muestras

En el campo experimental INIFAP-El Palmar se tomaron muestras en las plantaciones de 8 y 18 años de edad de los árboles. Se colectaron hojas y ramas después del trabajo de poda y aserrín de madera, de una carpintería que aprovecha las trozas de cedro rojo.

En el campo experimental INIFAP-Bacalar se tomaron muestras de hojas y ramas en las plantaciones de 9 y 10 años de edad de los árboles, después del trabajo de poda (ANEXO 1).

Se recolectaron muestras de diferentes individuos al azar, las cuales se analizaron de forma independiente, etiquetadas como H1 a H8 en hojas y R1 a R8 en ramas. Adicionalmente se realizó una mezcla en partes proporcionales de H1 a H8 que se etiquetó como HM (hojas mezcla) y en ramas la mezcla de R1 a R8 en partes proporcionales se etiquetó como RM (rama mezcla).

Para el aserrín de madera recolectado en la carpintería se identificó como AM

En total se procesaron 17 muestras. En la tabla 1 se muestra la procedencia, edad y clave asignada.

Tabla 1. Descripción de muestras de *Cedrela odorata* L. recolectadas.

PROCEDENCIA	Hojas	Ramas	Aserrín
El Palmar			
8 años	H5, H6	R5, R6	
18 años	H1	R1, R2	
			AM
Bacalar			
9 años	H7, H8	R7, R8	
10 años	H3, H4	R3, R4	
Mezcla			
Ambos sitios	HM	RM	

### 6.3 Análisis químico

El material colectado fue secado a temperatura ambiente para su posterior molienda y tamizado, hasta un tamaño de partícula de malla 40. A cada muestra se le realizó el análisis de extraíbles totales, lignina insoluble, holocelulosa, celulosa y hemicelulosas, además se determinaron azúcares reductores y totales. También se evaluaron fenoles totales y capacidad de captura de radicales libres, el diagrama de flujo del proceso experimental se muestra en la figura 4.

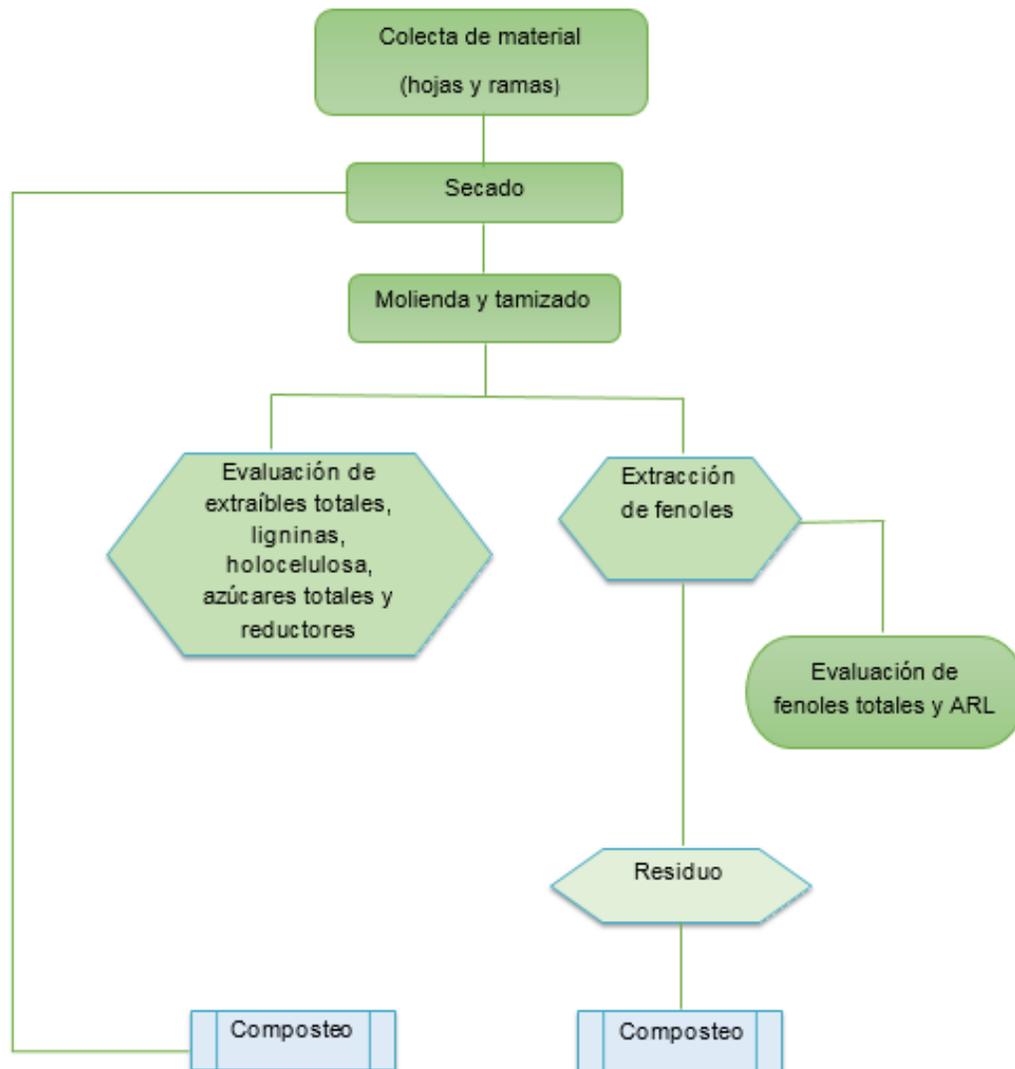


Figura 4. Diagrama de flujo del proceso experimental.

### 6.3.1 Determinación de Extraíbles

Se realizó la determinación de extraíbles basándose en la técnica para evaluación de la madera TAPPI 204 cm-97. Se utilizó un aparato de extracción Soxhlet y tres solventes de extracción, en forma sucesiva: Mezcla de etanol-Tolueno (1 volumen de etanol y 2 volúmenes de tolueno), etanol al 96% y agua en caliente, dejando el equipo en recirculación por 4h para cada solvente, transcurrido el tiempo de extracción el matraz se separó del aparato Soxhlet, se recuperó el solvente, se secó el matraz y su contenido en una estufa a  $105 \pm 3^{\circ} \text{C}$  por 4 horas.

El contenido de extracción (% extraíbles o % sólidos totales) se calculó de la siguiente forma:

$$\% \text{ Extraibles} = \frac{\text{Residuo}}{W_m} * 100$$

Donde:

$W_m$  = peso de la muestra

### 6.3.2 Determinación de lignina insoluble

Basado en la técnica TAPPI 222 om-02 para lignina insoluble. Se pesaron  $300 \text{ mg} \pm 10 \text{ mg}$  de muestra, se agregaron 3mL de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  al 72%, se puso a baño maría a  $30 \pm 3^{\circ}\text{C}$  por 60 min, se agregaron 51 mL de agua destilada para diluir al 4%. Los matraces se taparon y se metieron en el autoclave a  $121^{\circ}\text{C}$  por 1h, se enfriaron a temperatura ambiente, la mezcla en los matraces se filtró y midió el volumen (se guardó el filtrado), el precipitado que queda en el crisol se lavó con 100mL de agua destilada caliente, el crisol con el precipitado se secó a  $100^{\circ}\text{C}$  y se registró su peso.

El contenido de lignina se calculó de la siguiente forma:

$$\% \text{ Ligninas} = \frac{W_r}{W_m} * 100$$

Donde:

Wr= peso del residuo

Wm= peso de la muestra

### **6.3.3 Determinación de holocelulosa, celulosa y hemicelulosa**

Para la determinación de holocelulosa las muestras se mandaron analizar siguiendo el manual de procedimientos de laboratorio de química de la madera del instituto nacional de investigaciones forestales, agrícolas y pecuarias (INIFAP) campo experimental San Martinito, Puebla (Honorato, 2007).

### **6.3.4 Azúcares totales**

Se analizaron a partir del filtrado de la evaluación de lignina insoluble (descrito en 6.3.2). Se usó la técnica de fenol-ácido sulfúrico (Chaplin y Kennedy, 1986). Se mezcló un 1 mL de muestra, 1 mL de fenol al 5% y 5mL de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, después de reaccionar se dejó enfriar, las muestras se leyeron en el espectrofotómetro a una absorbancia a 490 nm posterior a la dilución de las muestras (1:50), al mismo tiempo se hizo una curva de calibración con glucosa a concentraciones de 20, 40,60, 80 y 100 ppm ( $y=0.0088x + 0.0066$ ;  $R^2= 0.9976$ ) (ANEXO 2).

### **6.3.5 Azúcares Reductores**

Se analizaron a partir del filtrado de la evaluación de lignina insoluble (descrito en 6.3.2). Se usó la técnica del ácido dinitrosalicílico (DNS). Se disolvieron 50 µL de muestra en 450 µL de agua destilada y 500 µL del reactivo DNS, la mezcla se puso en ebullición durante 5 min, se enfrió y se agregaron 4 mL de agua destilada, se mezcló en el vortex y se leyeron las muestras en el espectrofotómetro a una absorbancia de 540 nm, se realizó curva de calibración con glucosa a 200, 400, 600, 800, 1000 ppm ( $y= 0.0002x - 0.0308$ ;  $R^2=0.9981$ ) (ANEXO 2).

## 6.4 Cuantificación de fenoles

### 6.4.1. Obtención de los fenoles

Se obtuvieron extractos fenólicos utilizando dos solventes en forma sucesiva, etanol al 70% como primer solvente de extracción y agua destilada en la segunda etapa de extracción. Se utilizaron estos solventes considerando tener la aplicación de los fenoles para áreas biomédicas.

Las muestras de hojas, ramas y aserrín se pusieron a macerar por separado en etanol acuoso al 70% a temperatura ambiente durante 24 h. Por cada 100g de material se adicionaron 500mL de etanol al 70%, transcurrido el tiempo se filtró el extracto resultante sobre papel filtro. Se midió el volumen total del solvente con el extracto. Se evaluó la cantidad de sólidos extraídos (rendimiento de extracto) y una parte del extracto se llevó a sequedad para el análisis de fenoles totales.

El material remanente de la extracción con etanol al 70% se puso a macerar nuevamente en agua destilada. Se siguió el mismo procedimiento reportado para la extracción con etanol 70%. Se evaluaron rendimiento en sólidos y fenoles totales.

### 6.4.2. Evaluación de Fenoles totales.

Para la cuantificación de fenoles totales se utilizó el método de Folín-Ciocalteu reportado por Rosales *et al* (2006). Se trabajó con una curva de calibración de ácido gálico a 6 concentraciones 100, 200, 300, 400, 500 y 600 ppm ( $y = 0.001x + 0.0371$ ;  $R^2 = 0.9969$ ) (ANEXO 2), tanto el ácido gálico como las muestras de los extractos etanólico y acuoso secos se prepararon a una concentración de 1000 ppm, se tomaron 50  $\mu$ L del extracto, se le adicionaron 3 mL de agua destilada, 250  $\mu$ L de reactivo Folín-Ciocalteu. Después de 1 min y antes de 8 min de agregar el reactivo de Folín se adicionaron 750  $\mu$ L de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  al 20% y 950  $\mu$ L de agua destilada, se dejó reposar por 2h en la obscuridad y se leyó la absorbancia a 760 nm. Los resultados se expresaron como mg equivalentes de ácido gálico/g de extracto seco (mg EAG/g). Todas las determinaciones se hicieron por triplicado.

---

### 6.4.3 Evaluación de la capacidad de captura de radicales libres

La capacidad de captura de radicales libres en los extractos se realizó mediante el método del DPPH (2,2-Difenil-1-picryl hidrazil). Para esta evaluación los extractos secos se disolvieron en etanol acuoso al 50%, a concentraciones de 250, 500, 750 y 1000 ppm. Como parámetros de referencia se utilizaron los estándares catequina y rutina a concentraciones de 50, 100, 200 y 300 ppm. A 50  $\mu\text{L}$  del extracto o estándar se le adicionaron 1950  $\mu\text{L}$  de la solución  $1 \times 10^{-3}$  M del radical DPPH, se homogenizaron las muestras y después de 30 minutos se leyó la absorbancia a 515nm, como blanco en lugar de muestra se usaron 50  $\mu\text{L}$  de etanol al 50% en lugar del extracto. Se calculó la capacidad de capturar de radicales libres (ARL) de acuerdo a la siguiente formula:

$$ARL = \frac{100 (A_0 - A_m)}{A_0}$$

Donde:

$A_0$  = Absorbancia inicial del radical DPPH sin muestra

$A_m$  = Absorbancia de la solución con muestra (DPPH + extracto)

### 6.5 Obtención y evaluación de la composta

Establecer el proceso de composteo fue con el fin de minimizar el tiempo de incorporación de la biomasa a su entorno. El material residual (hojas, ramas y aserrín) se utilizó en dos formas: como material completo tal como se recolectó en las plantaciones y que contenía sus compuestos extraíbles, así como el material sin extraíbles (el residuo después de la extracción con etanol 70% y agua). En la Tabla 2 se detallan las formulaciones utilizadas. A todas las muestras sometidas a compostaje se les determinó su tiempo de composteo y la calidad del mismo a través de pruebas de germinación, materia orgánica, pH, conductividad eléctrica y relación C/N.

Con respecto al tamaño de partícula de los residuos el aserrín se compostó tal cual fue recolectado, las hojas se secaron y se trituraron de forma manual. El

tamaño de partícula del material de ramas fue el de malla 40, ya que se utilizó el material sobrante de la evaluación química.

Para aportar el nitrógeno necesario para la actividad de los microorganismos se agregó estiércol en una relación 1:1 (residuo-estiércol) (ANEXO 3).

Tabla 2. Formulaciones usadas para la composta; cuya combinación resultó en 6 tratamientos (3x2).

<b>Factor 1 (Dos niveles)</b>		
<b>Factor 2 (Tres niveles)</b>	Material con extraíbles	Material sin extraíbles
Hojas	Tratamiento I	Tratamiento II
Ramas	Tratamiento III	Tratamiento IV
Aserrín	Tratamiento V	Tratamiento VI

### 6.5.1 Parámetros evaluados durante el compostaje

#### -pH y Conductividad eléctrica

Se prepararon extractos de cada uno de los tratamientos relación 1:10 (muestra: agua destilada), se centrifugaron a 6000 rpm durante 20 minutos, para las mediciones de pH se utilizó un potenciómetro marca Orion modelo 230, para la conductividad se usó un conductímetro marca Orion modelo 162.

#### -Materia Orgánica

Para determinar éste parámetro se empleó la técnica de ignición de Zhu *et al.*, (2004), mediante combustión seca de las muestras a 550 °C durante 6h. La materia orgánica se calculó de la siguiente manera.

$$\% M.O = \frac{PMS - PMC}{PMS} * 100$$

Donde:

PMS: Peso de la muestra seca

PMC: Peso de la muestra calcinada

### 6.5.2 Madurez de la composta

#### -Carbón orgánico total

Se determinó de acuerdo a la relación establecida por New Zealand Researchers. El contenido de ceniza se calculó por el método de ignición a 550°C por 6h (Zhu *et al.*, 2004).

$$\% C = \frac{100 - \% \text{ Cenizas}}{1.8}$$

#### -Nitrógeno

Para la determinación de nitrógeno se utilizó el método de Kjeldahl con modificación en el volumen de reactivos usados. Las muestras se secaron a temperatura ambiente y se pasaron por un tamiz de malla 50, el porcentaje de nitrógeno se calculó de la manera siguiente:

$$\% N = \frac{\text{ml de ácido} * N \text{ de } H_2SO_4 * 1.4}{\text{Peso de la muestra}}$$

#### -Relación C/N

Expresa las unidades de carbono por unidades de nitrógeno que contiene un material, esta relación se determina en base a los datos obtenidos del porcentaje de carbono y de nitrógeno, se calcula de manera siguiente:

$$\text{Relacion } C/N = \frac{\%C}{\%N}$$

---

---

### **-Toxicidad en la composta por pruebas de germinación**

Las pruebas de germinación se realizaron en base al test de Zucconi (Varnero *et al.*, 2006) usando semillas de lechuga Romana (*Lactuca sativa* L.) ya que esta especie es sensible a compuestos tóxicos, sustancias estimuladoras y altas conductividades eléctricas.

Se prepararon extractos acuosos relación 1:10 (muestra de composta: agua destilada) se colocaron 5 mL de éste extracto en placas Petri con 20 semillas sobre papel filtro y se mantuvieron durante 5 días en una estufa a 20°C, donde se contó el número de semillas germinadas y se midió la longitud de la raíz de las plántulas, para determinar el porcentaje de germinación relativo (PGR), crecimiento relativo de raíz (CRR) y con ello calcular el índice de germinación (IG) de acuerdo a las siguientes ecuaciones:

$$PGR = \frac{N^{\circ} \text{ de semillas germinadas en el extracto}}{N^{\circ} \text{ de semillas germinadas en el testigo}} * 100$$

$$CRR = \frac{\text{Elogacion de radículas en el extracto}}{\text{Elogacion de radículas en el testigo}} * 100$$

$$IG = \frac{PGR * CRR}{100}$$

### **6.6 Análisis de resultados**

Para validar las diferencias encontradas en los contenidos de extraíbles, ligninas, holocelulosa, azúcares totales y reductores, fenoles y capacidad antioxidantes se utilizaron: un ANOVA de bloques al azar para todas las muestras, un ANOVA de bloques al azar con arreglo factorial para contrastar los valores por sitios y entre hojas y ramas, otro ANOVA factorial para establecer las calidades de compostas obtenidas (ANEXO 4), las pruebas de medias se realizaron con Fisher a un  $\alpha=0.05$ . Todos los análisis estadísticos se corrieron con ayuda del software STATISTICA ver 7.0 (Statistica ver 7.0, 1984-2004)

## VII RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 7.1 Determinación de extraíbles

Se encontraron diferencias significativas en los porcentajes de extracción que se obtuvieron con los diferentes solventes utilizados: etanol-tolueno, etanol 96% y agua destilada ( $p < 0.05$ ), y entre el tipo de material analizado: hojas, ramas, aserrín ( $p < 0.05$ ). Como se observa en la figura 5, donde las hojas tienen un mayor contenido de extraíbles con un promedio de 37% en comparación con las ramas y el aserrín con promedios de extracción de 6 y 5% respectivamente los cuales estadísticamente no presentan diferencias significativas ( $p > 0.05$ ) (Tabla 3).

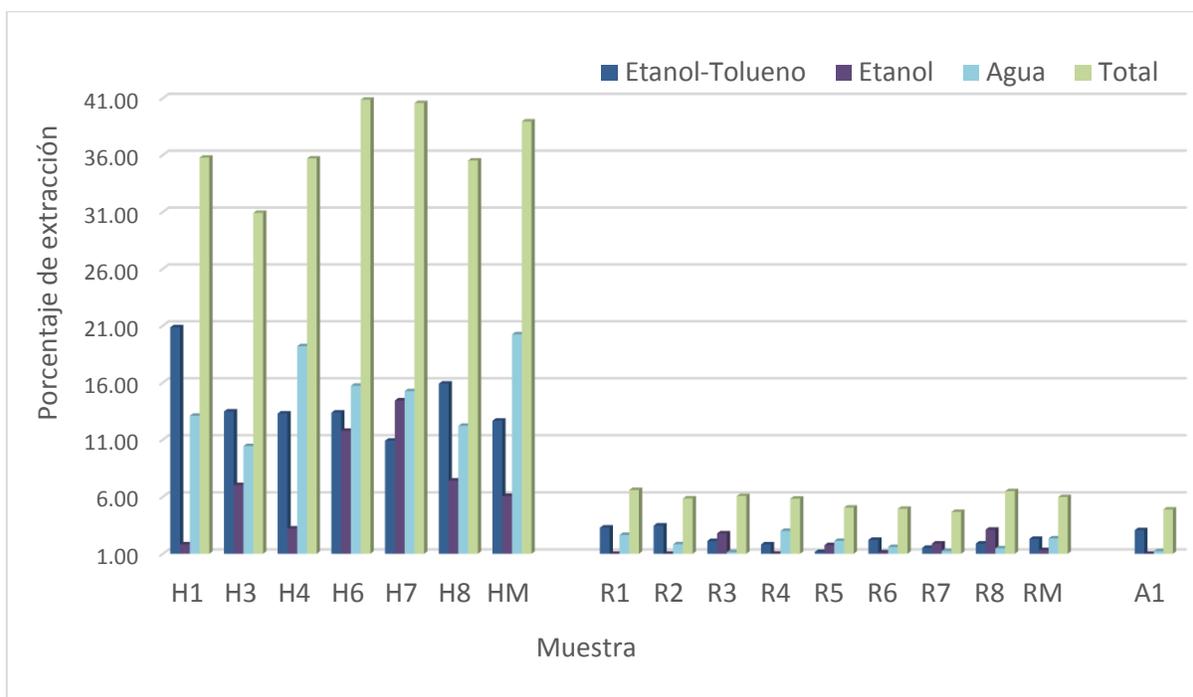


Figura 5. Porcentajes de extraíbles para los tres solventes usados y el total.

Las hojas de cedro rojo contienen un mayor número de sustancias extraíbles, los solventes que presentaron la mayor extracción fueron la mezcla de etanol:tolueno y el agua.

Tabla 3. Porcentajes totales de extraíbles en cada una de las muestras.

Muestra	% Extraíbles
H1	35.77 b
H3	30.92 b
H4	35.69 b
H6	40.86 b
H7	40.57 b
H8	35.52 b
HM	38.95 b
R1	6.58 a
R2	5.85 a
R3	6.05 a
R4	5.83 a
R5	5.04 a
R6	4.94 a
R7	4.67 a
R8	6.49 a
RM	5.97 a
A1	1.80 a

Letras desiguales indican diferencias estadísticas significativas (Fisher LSD  $p < 0.05$ )

## 7.2 Determinación de biomasa lignocelulosica

### 7.2.1 Contenido de lignina

El porcentaje de lignina varió entre 28% a 35% en hojas, 26% a 32% en ramas y en el aserrín el valor fue de 33%. De acuerdo al análisis estadístico no se encontraron diferencias significativas entre el tipo de material y el contenido de ligninas ( $p > 0.05$ ).

Los residuos de 10 y 9 años mostraron contenidos similares de ligninas y se relacionaron con la procedencia de Bacalar, los de la mezcla de aserrín, 8 y 18 años se relacionaron con el Palmar (Tabla 4). Correspondiente a la agrupación original del material.

Lo que sugiere que la concentración de ligninas esta mayormente influenciada por la procedencia, que por la edad de los residuos.

Tabla 4. Porcentaje de ligninas en referencia a la edad y procedencia de los residuos de cedro rojo.

Muestra	% Ligninas	Edad	Procedencia
H1	33.49 c	18 años a	Palmar a
H3	26.46 c	10 años b	Bacalar b
H4	29.33 c	10 años b	Bacalar b
H6	34.43 c	8 años a	Palmar a
H7	35.28 c	9 años b	Bacalar b
H8	27.60 c	9 años b	Bacalar b
R1	31.35 c	18 años a	Palmar a
R2	27.60 c	18 años a	Palmar a
R3	26.3 c	10 años b	Bacalar b
R4	27.84 c	10 años b	Bacalar b
R5	31.16 c	8 años a	Palmar a
R6	31.98 c	8 años a	Palmar a
R7	27.69 c	9 años b	Bacalar b
R8	29.94 c	9 años b	Bacalar b
A1	33.11 c	Mezcla a	Palmar a

Letras desiguales indican diferencias estadísticas significativas (Fisher LSD  $p < 0.05$ )

## 7.2.2 Contenido de holocelulosa, celulosa y hemicelulosa

Los contenidos de holocelulosa en las hojas fueron de 60% a 68%, mientras que en las ramas fue de 69% a 79% y en aserrín un promedio de 72%. Existen diferencias estadísticas significativas entre el porcentaje de holocelulosa con su tipo de material, procedencia y edad ( $p < 0.05$ ). La Tabla 5 y figura 6 muestran los contenidos de holocelulosa total, celulosa y hemicelulosa, de las 17 muestras analizadas.

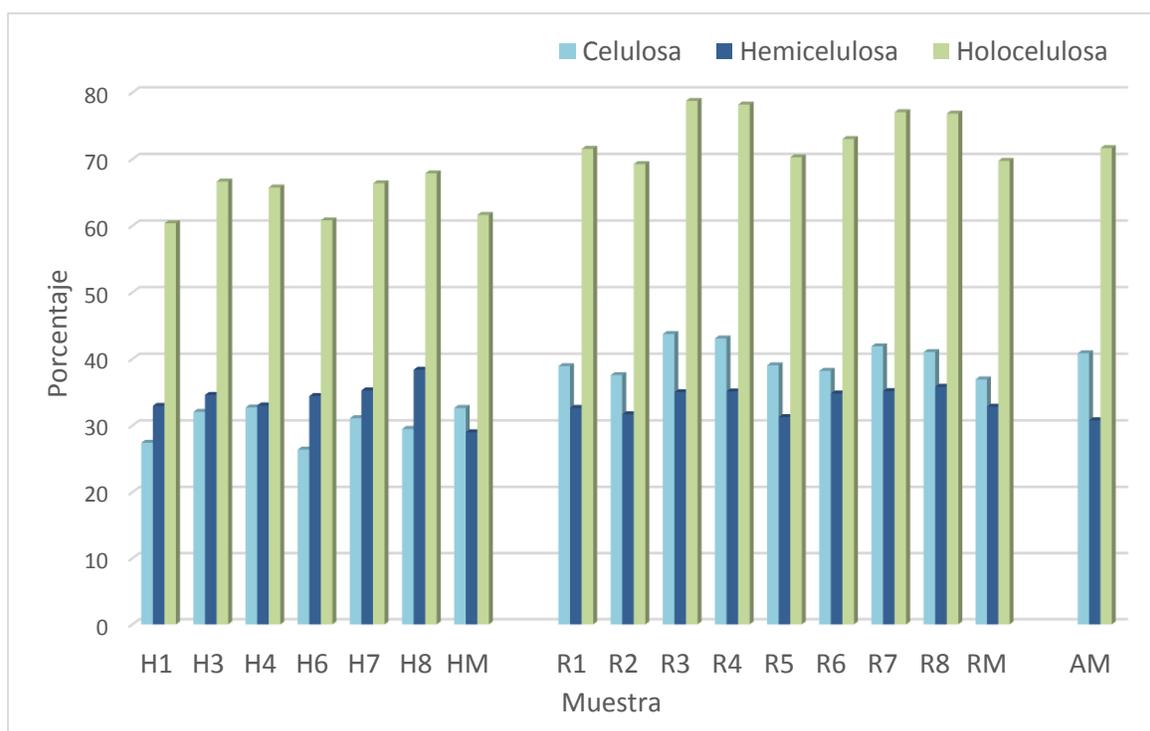


Figura 6. Contenido de holocelulosa, hemicelulosa y celulosa de los residuos de cedro rojo.

Las ramas y el aserrín presentaron porcentajes superiores en celulosa con respecto a las hojas, con valores de 26% a 33% en hojas, 37% a 44% en ramas y 41% en aserrín. Los porcentajes de hemicelulosa fueron de 29% a 38% en hojas, 31% a 36% en ramas y 31% en aserrín.

Tabla 5. Porcentajes promedio y desviación estándar para celulosa, hemicelulosa y holocelulosa.

Muestra	% Celulosa	% Hemicelulosa	% Holocelulosa
H1	27.41 ± 0.27	32.95 ± 0.44	60.36 ± 0.71
H3	32.05 ± 0.31	34.59 ± 0.31	66.64 ± 0.44
H4	32.71 ± 0.53	33.02 ± 0.65	65.74 ± 0.33
H6	26.39 ± 0.26	34.43 ± 0.43	60.81 ± 0.54
H7	31.09 ± 0.84	35.28 ± 0.43	66.37 ± 0.45
H8	29.48 ± 0.47	38.38 ± 0.62	67.86 ± 0.75
HM	32.63 ± 0.14	28.99 ± 0.41	61.62 ± 0.49
R1	38.91 ± 0.12	32.64 ± 0.23	71.54 ± 0.23
R2	37.56 ± 0.44	31.69 ± 0.34	69.25 ± 0.17
R3	43.73 ± 0.52	35.00 ± 0.37	78.74 ± 0.89
R4	43.07 ± 0.27	35.12 ± 0.44	78.19 ± 0.63
R5	39.03 ± 0.29	31.26 ± 0.26	70.28 ± 0.15
R6	38.21 ± 0.57	34.81 ± 0.63	73.02 ± 1.15
R7	41.89 ± 0.17	35.16 ± 0.62	77.05 ± 0.68
R8	41.02 ± 0.11	35.81 ± 0.45	76.84 ± 0.49
RM	36.93 ± 0.47	32.81 ± 0.21	69.74 ± 0.17
AM	40.85 ± 0.13	30.80 ± 0.08	71.65 ± 0.21

Al comparando los resultados obtenidos con el estudio realizado por Gómez *et al.* (2012), en el que evaluó material lignoceluloso de 23 especies entre ellas *Cedrela odorata*, *Eucalyptus camaldulensis* y *Pinus patula*, de plantaciones forestales comerciales de Colombia para la producción de bioetanol, a excepción del porcentaje de ligninas en ramas, todos los valores son superiores a los que ellos reportan ver tabla 6.

Tabla 6. Biomasa lignocelulosica para dos especies con alto potencial para la producción de bioetanol en comparación con *Cedrela odorata*.

Especie	Celulosa (%)	Hemicelulosa (%)	Holocelulosa (%)	Lignina (%)
<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	45.5	16.5	62	26
<i>Pinus patula</i>	48.7	32.7	81.4	18.5
<i>Cedrela odorata</i> *	37	18	55	33
<i>Cedrela odorata</i> **	40.45	32.31	72.76	31.60

\*Contenidos reportados por Gómez *et al.* (2012). \*\*Porcentajes promedio obtenidos en esta investigación.

Por lo que Gómez *et al.* (2012) proponen que las especies de árboles con mayor aptitud para la producción de bioetanol son *Eucalyptus camaldulensis* y *Pinus patula*, por contener altos porcentajes de holocelulosa. Lo que se contrapone con lo encontrado en este trabajo, donde los porcentajes de holocelulosa en *Cedrela odorata* se encuentran entre los obtenidos para *Eucalyptus camaldulensis* y *Pinus patula*.

Los parámetros más importantes al evaluar material lignocelulosico para la producción de bioetanol son que tengan altos contenidos de holocelulosa y bajas concentraciones de lignina (López, 2008; Guarnizo *et al.* 2009, Álvarez *et al.* 2013; Gómez *et al.* 2012), por lo que *Cedrela odorata* se perfila como un buen competidor en la producción de bioetanol, aunado a esto los materiales que se estarían usando para este fin serian residuos forestales, por lo que no se competiría con la industria forestal y se les daría un valor agregado a estos.

### 7.3 Contenido de azúcares totales y reductores

La figura 7 muestra el contenido de azúcares totales y reductores en hojas, ramas y aserrín, en las hojas se obtuvieron de 25.67% a 31% de azúcares totales y 5.2% a 6.4% en azúcares reductores, mientras en las ramas los porcentajes fueron de 40.7% a 50.91% en totales y 7.8% a 9.0% en reductores. Para el aserrín los resultados fueron similares a los de ramas, de 52.41% totales y 8.68% reductores.

Existen diferencias estadísticas significativas entre el tipo de material para los totales, como para los reductores ( $p < 0.05$ ), en cuanto a la edad no se encontraron diferencias estadísticas significativas ( $p > 0.05$ ).

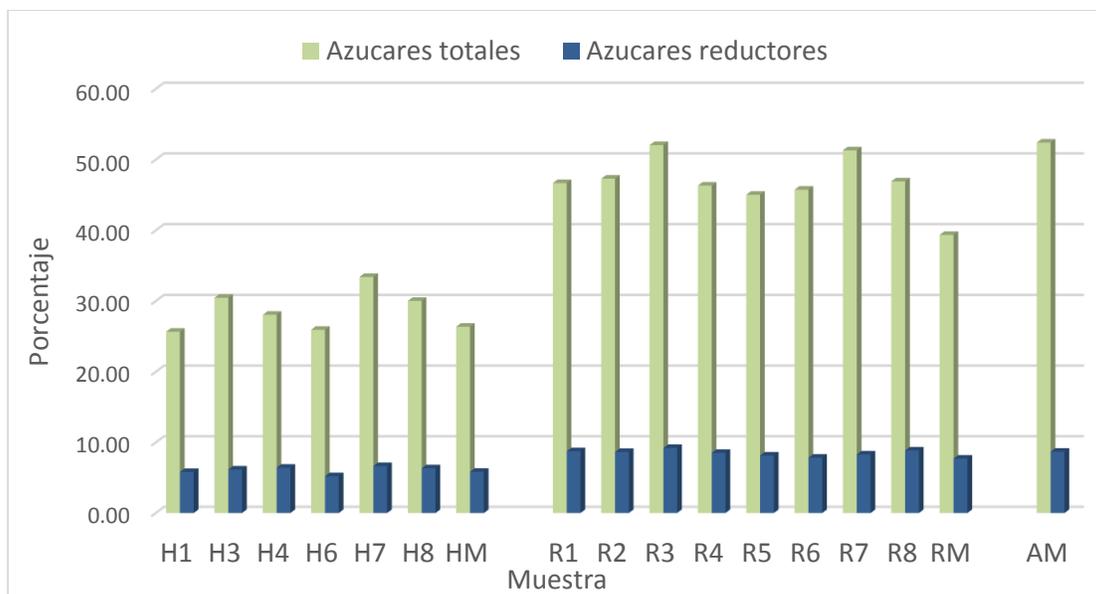


Figura 7. Contenido de azúcares totales y reductores de los residuos.

Los valores promedio para azúcares reductores en las hojas fue de 6% y en las ramas y aserrín de 9% porcentajes superiores a los que reportados por Gómez *et al.* (2013) para *Eucalyptus camaldulensis* (2.13%) y *Pinus patula* (1.9%), de los que mencionan ser catalogados como viables para la producción de etanol.

#### 7.4 Análisis por sitio de colecta

Con respecto a la procedencia del material se encontraron diferencias estadísticas significativas ( $p < 0.05$ ) de los valores de extraíbles, celulosa, hemicelulosa, azúcares totales, reductores y lignina entre los dos sitios de donde se recolectó el material. Excepto para lignina, el material de Bacalar contiene los mayores porcentajes, Figura 8. Estas diferencias probablemente sean atribuidas a las condiciones climáticas que cada uno de los sitios presenta. Bacalar tiene una menor precipitación anual, que es lo que tal vez influyan en la concentración de los metabolitos secundarios.

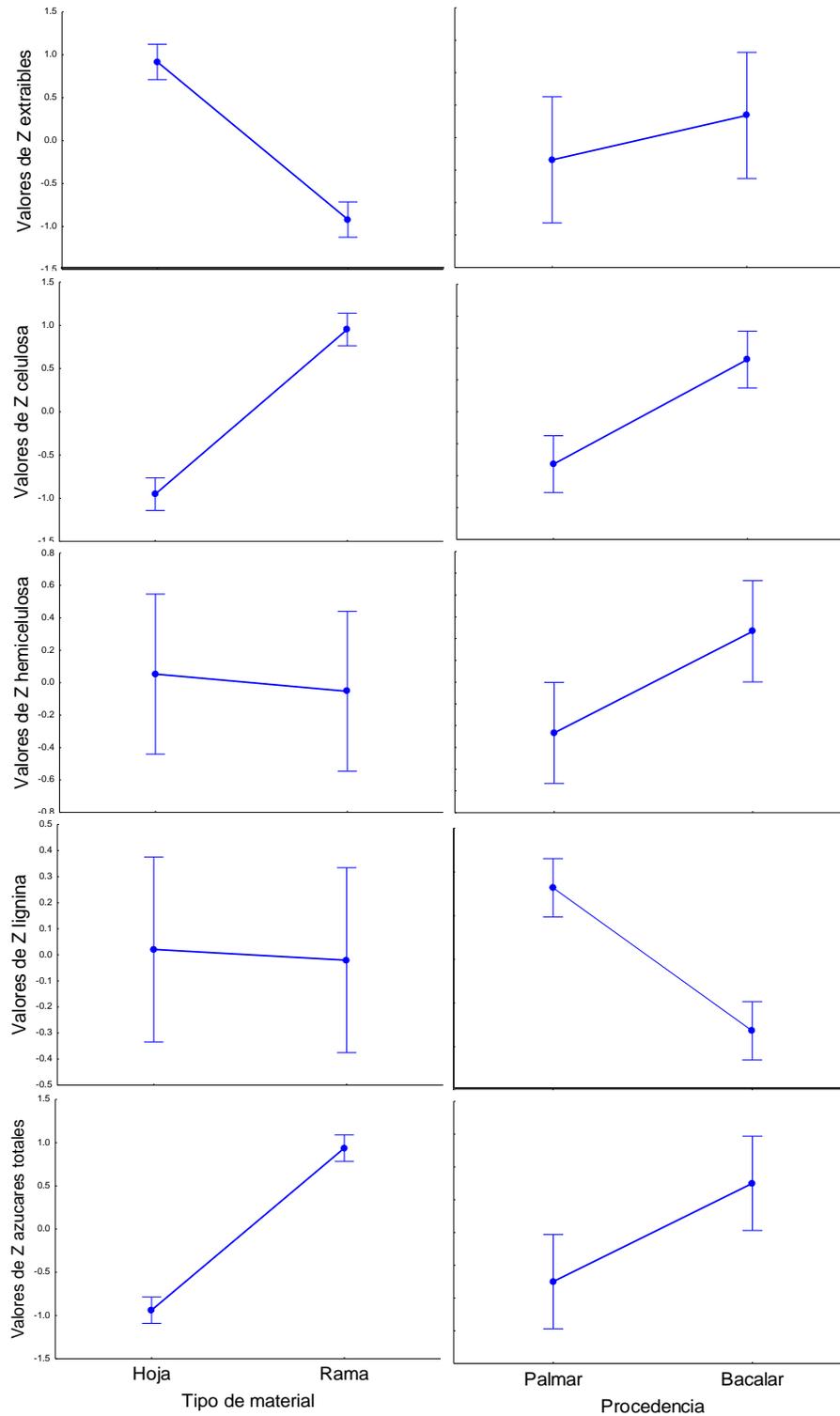


Figura 8. Análisis por sitio y tipo de material, donde se muestran las diferencias estadísticas encontradas de los ensayos realizados.

## 7.4 Contenido de Fenoles Totales

Los rendimientos de extracto variaron con respecto al tipo de material y al solvente de extracción (Figura 9, Tabla 7). En las hojas se tuvieron rendimientos de 15% con la extracción con etanol 70% y 8% con la extracción acuosa, dando un total de 23%. En las ramas el rendimiento fue considerablemente menor, con valores de 3% con la extracción de etanol 70% y 1% con agua, dando un rendimiento total de 4%. En el aserrín se tuvieron rendimientos de 2% y 1%, con un rendimiento total de 3%; rendimientos similares a los encontrados por Almonte-Flores (2014) para corteza de *Cedrela odorata*. Las ramas y el aserrín no presentaron diferencias significativas entre ellos ( $p > 0.05$ ). En los tres materiales los rendimientos de extractos etanólicos fueron mayores a los acuosos, comportamiento similar a lo reportado por Rosales y González, 2003; Jiménez *et al.* 2005 y Ramos *et al.* 2008 para otros materiales vegetales.

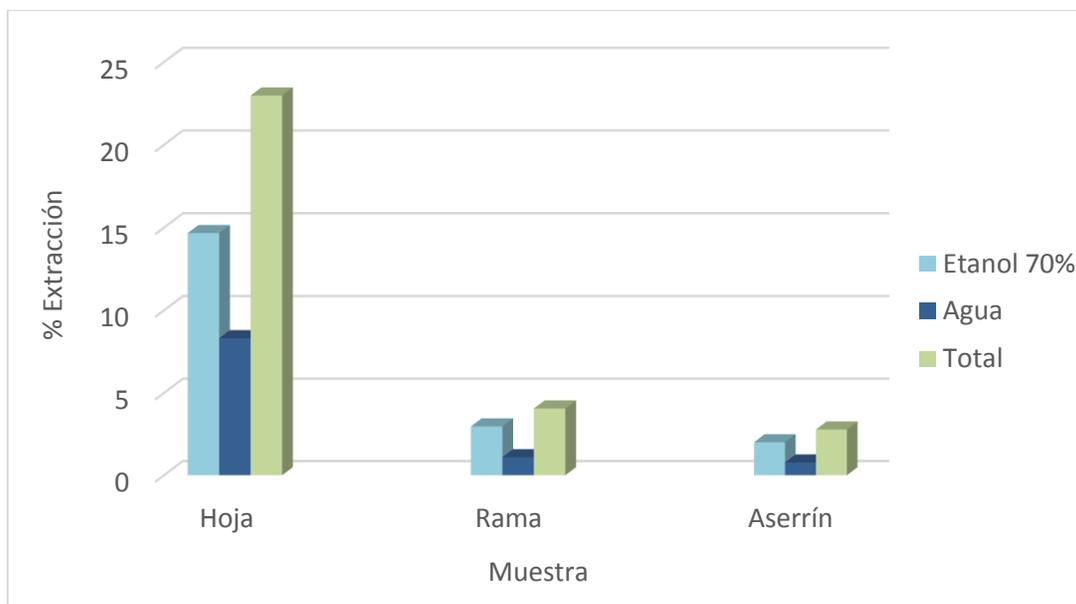


Figura 9. Rendimiento de extracción con etanol 70% y agua destilada.

Tabla 7. Porcentaje de sólidos para los extractos etanólico y acuoso.

Extracto etanólico		Extracto acuoso		Extracto total
Muestra	% Extracción	Muestra	% Extracción	%
Hojas	14.66 b	Hoja	8.31 b	22.97
Rama	2.96 a	Rama	1.09 a	4.05
Aserrín	2.00 a	Aserrín	0.77 a	2.77

Letras desiguales indican diferencias estadísticas significativas (Fisher LSD  $p < 0.05$ )

Los resultados de la concentración de fenoles totales expresados como mg de equivalentes de ácido gálico (EAG) por cada 100 mg de extracto (%) se muestran en la figura 10, siendo mayores en los extractos de aserrín y ramas que en las hojas, tanto para los extractos etanólicos como para los acuosos. El extracto de etanol 70% fue el que presentó mayor contenido de fenoles, con 12% para las hojas, 37% para ramas y 33 % para aserrín. Los extractos acuosos tuvieron 2% para hojas, 15% para ramas y 20% para aserrín. La suma de la concentración de fenoles obtenidos con ambos solventes de extracción, (considerando que fueron extracciones sucesivas) fue de 14% para hojas, 52% para ramas y 53% en aserrín.

Aunque las ramas y el aserrín presentan alta concentración de fenoles (52% base extracto), el rendimiento (en base a la cantidad de sólidos que se extraen del material) es muy bajo 4.0 y 2.7%, respectivamente por lo que el rendimientos de fenoles totales es de 2.0% en ramas y 1.4% en aserrín, mientras que en las hojas el rendimiento es alto en cantidad de solidos 23% pero la cantidad de fenoles es de solo 14%, dando un rendimiento de 3% de fenoles. Estos valores son bajos comparados con los que reportan Frías-Campomanes *et al.* (2013) para extracción de polifenoles a partir de bagazo de uva.

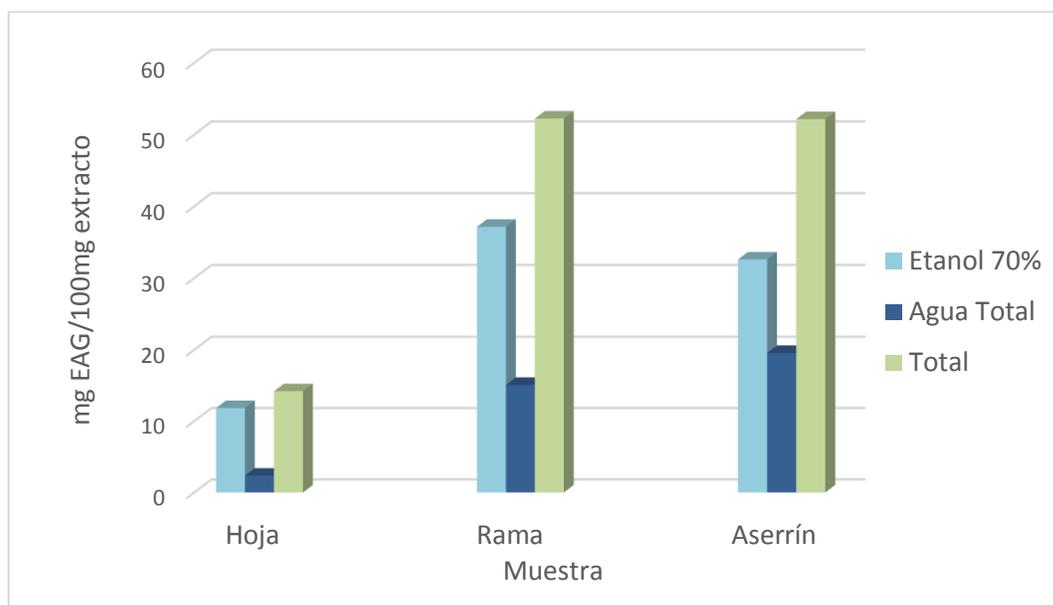


Figura 10. Fenoles totales expresados como mg EAG/ 100 mg de extracto.

#### 7.4.1 Evaluación de la capacidad de captura de radicales libres

En las tablas 8, 9 y 10 se presenta el promedio y desviación estándar de 4 repeticiones para la determinación de la capacidad de captura de radicales libres en los extractos etanólicos, acuosos y en dos estándares de referencia. Las cinéticas del comportamiento de la concentración de extractos de hojas, ramas, aserrín y estándares con respecto a la captura de radicales libres se presentan en las figuras 11, 12 y 13.

Tabla 8. Porcentajes promedio y desviación estándar de la capacidad de captura de radicales libres en los estándares de referencia.

Estándar	Concentración ppm			
	50	100	200	300
Catequina	24.59 ± 0.38	36.20 ± 1.57	59.28 ± 1.80	92.16 ± 0.56
Rutina	17.13 ± 1.19	25.91 ± 0.19	49.44 ± 1.13	71.14 ± 1.80

Tabla 9. Porcentaje promedio y desviación estándar de la capacidad de captura de radicales libres en extractos etanólicos.

Muestra	Concentraciones ppm			
	250	500	750	1000
Hoja	5.78 ± 0.14	13.14 ± 0.28	17.92 ± 0.35	24.42 ± 0.07
Rama	38.79 ± 1.74	67.13 ± 0.21	83.01 ± 0.91	90.25 ± 1.54
Aserrín	28.32 ± 1.12	51.39 ± 1.40	62.72 ± 0.70	85.79 ± 1.04

Tabla 10. Porcentaje promedio y desviación estándar de la capacidad de captura de radicales libres en extractos acuosos.

Muestra	Concentraciones ppm			
	250	500	750	1000
Hoja	1.04 ± 0.07	3.39 ± 0.14	5.01 ± 0.29	6.75 ± 0.66
Rama	13.7 ± 0.63	25.53 ± 0.24	39.55 ± 0.35	48.98 ± 1.09
Aserrín	13.93 ± 0.68	27.34 ± 0.42	39.55 ± 1.39	50.51 ± 0.63

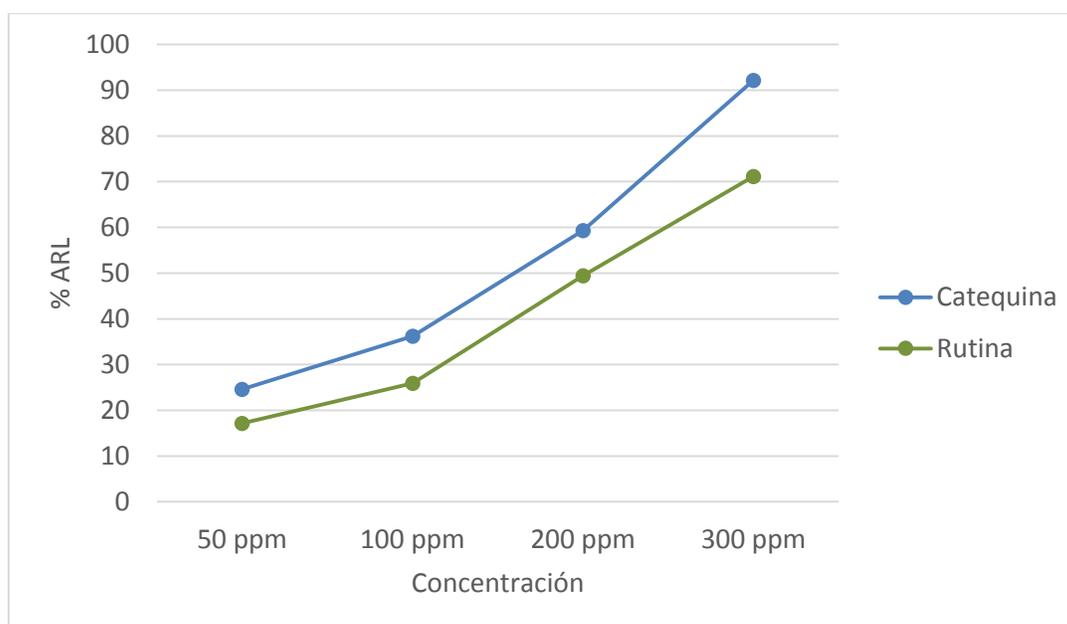


Figura 11. Captura de radicales libres en estándares.

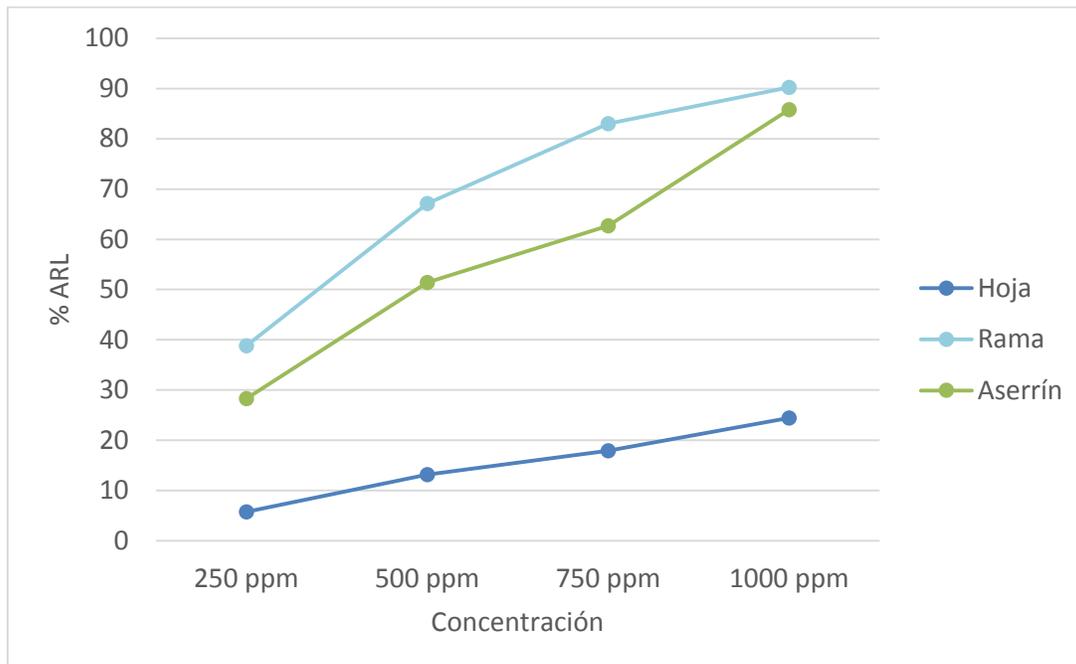


Figura 12. Captura de radicales libres en extractos etanólicos.

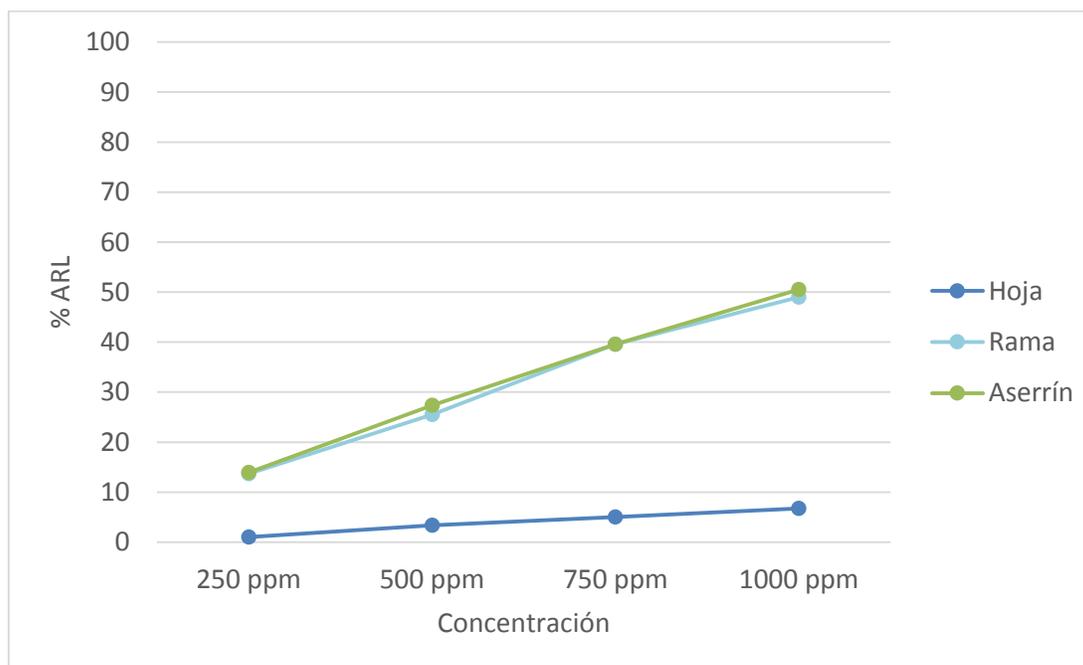


Figura 13. Captura de radicales libres en extractos acuosos.

Las ramas y el aserrín tuvieron la mayor concentración en fenoles totales lo que dio como resultado una mayor capacidad de captura de radicales libres tanto para extractos acuosos como etanólicos. Con las concentraciones probadas los estándares lograron una atrapamiento de radicales libres a una concentración de 300 ppm de 92% y 71% para catequina y rutina respectivamente, las ramas y el aserrín a una concentración de 1000 ppm en extractos etanólicos de 90% y 86% respectivamente. Mientras en extractos acuosos a la misma concentración se obtuvieron 49 y 51% para rama y aserrín respectivamente.

Las hojas al tener una menor cantidad de compuestos fenólicos su actividad antioxidante se ve reducida, razón por la cual se probaron concentraciones de extracto de 3000 ppm y 5000 ppm, obteniendo porcentajes de captura de radicales libres para extractos etanólicos de 64 y 86%, a dichas concentraciones. Por otra parte los extractos acuosos no lograron llegar a un porcentaje de captura de 50% o superior a consecuencia de la baja concentración de fenoles totales, las máximas concentración obtenidas son de 24 y 36% para 3000 y 5000 ppm respectivamente.

Los residuos después de haberles removido los extraíbles, fueron reutilizados para producir composta y reintegrarlos al suelo, además se pusieron a compostar residuos tal como son abandonados en el monte o en la propia plantación, a continuación se describe el proceso de compostaje.

## **7.5 Parámetros evaluados durante el proceso de composteo**

### **-pH**

Existen diferencias estadísticas significativas entre el pH con respecto al tiempo y a los tratamiento ( $p < 0.05$ ) (Tabla 11). El pH en los tratamientos I y II presento un comportamiento similar durante el proceso de compostaje siendo estadísticamente diferentes al resto de los tratamientos; los cuales a su vez también tuvieron un comportamiento estadísticamente igual entre ellos (Figura 14). En el pH inicial y final de los tratamientos con y sin extraíbles no hubo diferencias estadísticas significativas ( $p > 0.05$ ), los cambios en el pH solo fue influenciado por el tipo de

material que se sometió a compostaje (Tabla 11), no habiendo diferencias estadísticas entre los tratamientos de las ramas y los del aserrín ( $p > 0.05$ ). Cabe mencionar que en el tratamiento II compuesto por hojas sin extraíbles mostro un pH cercano a 7.

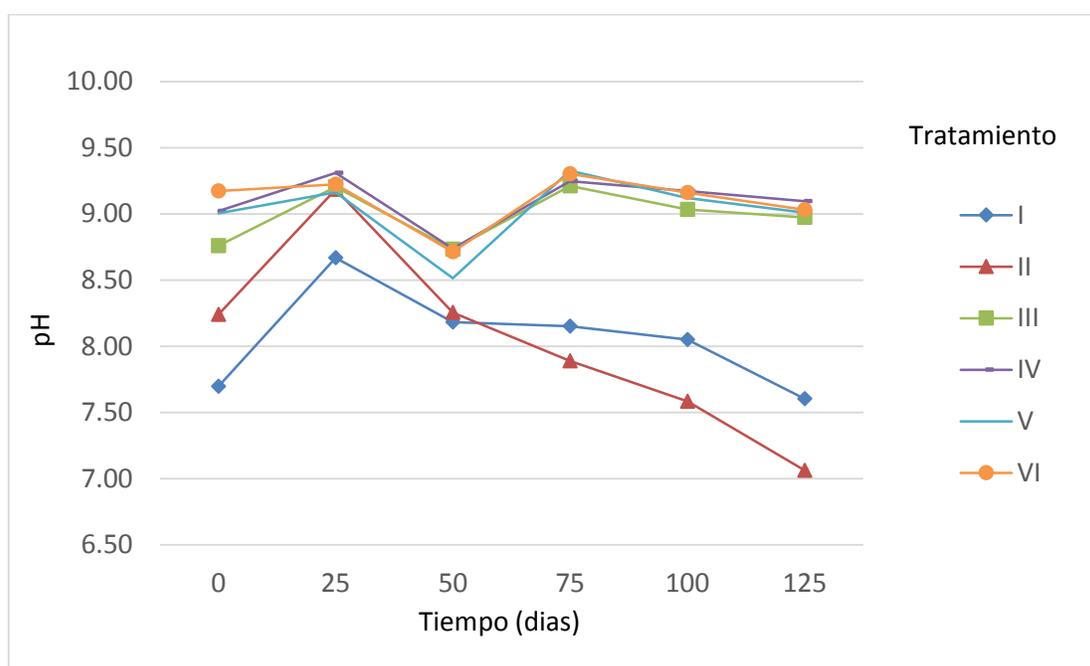


Figura 14. Evolución del pH durante el proceso de composteo.

Tabla 11. Valores iniciales y finales de pH en los diferentes tratamientos.

Tratamiento	pH Inicial	pH Final
I	7.70 b	7.60 b
II	8.24 b	7.06 b
III	8.76 a	8.97 a
IV	9.02 a	9.10 a
V	9.00 a	9.01 a
VI	9.17 a	9.03 a

Letras desiguales indican diferencias estadísticas significativas (Fisher LSD  $p < 0.05$ )

La NTEA-006-SMA-RS-2006 establece que el rango de pH para un compost maduro es de 6.5-8.0, tomando en cuenta este parámetro solo los compost procedentes de los tratamientos I, II están dentro de este rango.

Por otra parte la Organización Mundial de la Salud (OMS) establece parámetros para evaluar la calidad de compost con fines comerciales, presentando rangos más amplios para pH que van de 6.0-9.0, rango en el cual todos los compost procedentes de los residuos de cedro rojo se encuentran dentro.

### **-Conductividad eléctrica**

Existen diferencias significativas entre la conductividad y los tratamientos en los diferentes tiempos ( $p < 0.05$ ). Al igual que con el pH no existen diferencias estadísticas significativas ( $p > 0.05$ ) que indique que los extraíbles tengan alguna influencia en la evolución de la conductividad, sin embargo en la prueba LSD se observan diferencias entre las hojas con y sin extraíbles (Tabla 12).

Esta variable aumento con el paso del tiempo debido a la mineralización de la materia orgánica como se muestra en la figura 15, en la cual los tratamientos I y II presentaron la mayor conductividad eléctrica y según la clasificación de Domínguez (2010) son extremadamente salinos ( $> 3.40 \text{ ms/cm}$ ).

Al realizar la evaluación de extraíbles en la caracterización de biomasa lignocelulosica las hojas presentaron los mayores porcentajes de extracción en agua, lo que trae como consecuencia una mayor concentración de sales que debió influenciar la conductividad eléctrica de los tratamientos que contenían este material.

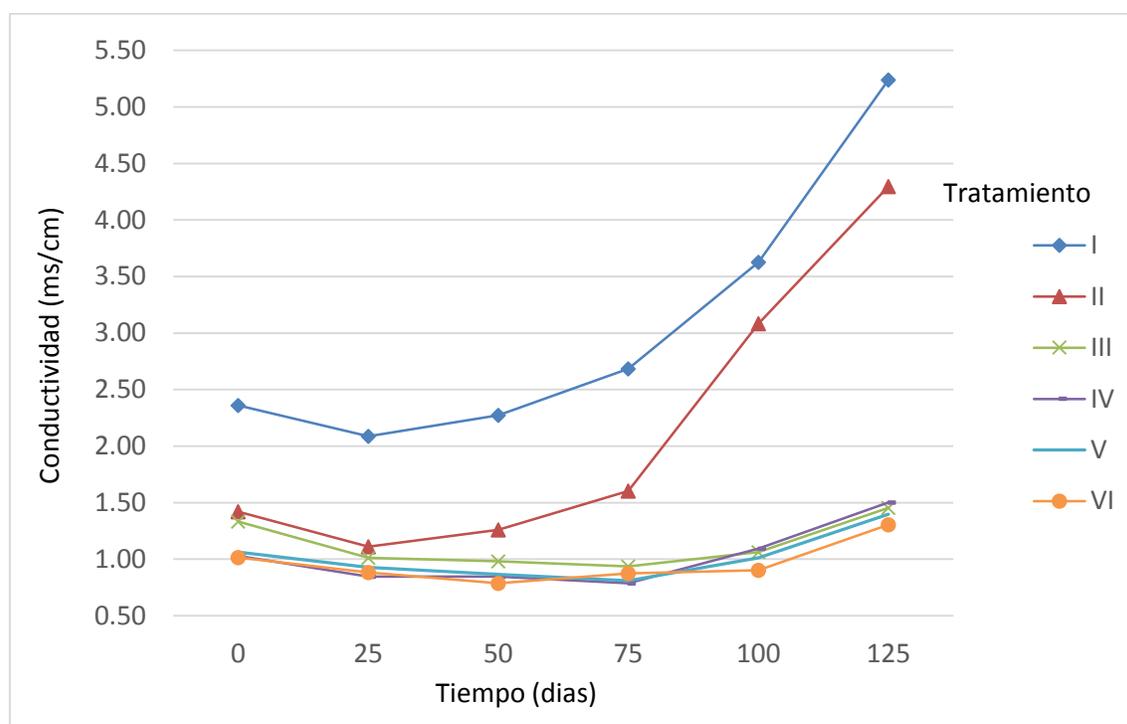


Figura 15. Evolución de la conductividad eléctrica el composteo.

Tabla 12. Valores iniciales y finales de la conductividad eléctrica en los diferentes tratamientos.

Tratamiento	Conductividad Inicial (ms/cm)	Conductividad Final (ms/cm)
I	2.36 c	5.24 c
II	1.42 b	4.30 b
III	1.33 a	1.45 a
IV	1.03 a	1.50 a
V	1.06 a	1.40 a
VI	1.02 a	1.31 a

Letras desiguales indican diferencias estadísticas significativas (Fisher LSD  $p < 0.05$ )

## -Materia Orgánica

Existen diferencias estadísticas significativas en la disminución de la materia orgánica entre los tratamientos y el tiempo de compostaje ( $p < 0.05$ ), comportamiento esperado (Figura 16). No hay diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos con y sin extraíbles ( $p > 0.05$ ), a excepción de los tratamiento de hojas con y sin extraíbles en donde el contenido final de materia orgánica fue mayor a la de los otros tratamientos (40 y 36% de materia orgánica) (Tabla 13).

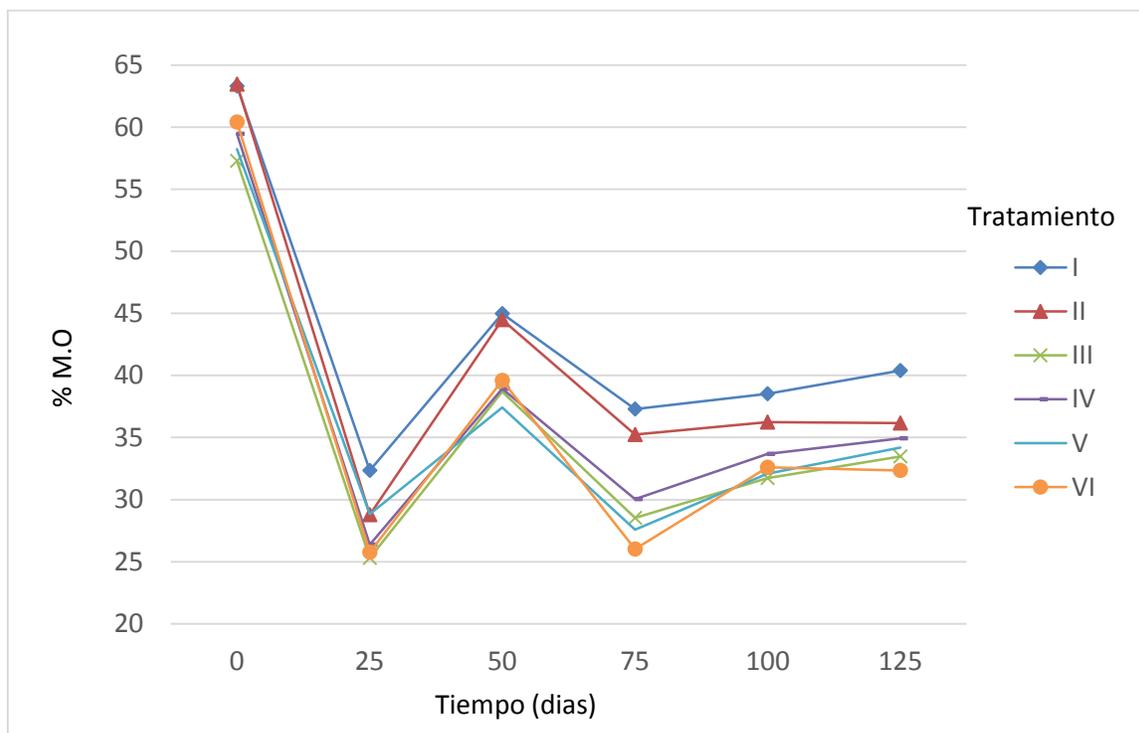


Figura 16. Evolución de la materia orgánica en el composteo.

Tabla 13. Valores iniciales y finales de materia orgánica y su reducción durante el compostaje de los residuos.

Tratamiento	M.O Inicial (%)	M.O Final (%)	Reducción (%)
I	63.29 b	40.39 c	22.90
II	63.46 b	36.18 b	27.28
III	57.27 a	33.48 a	23.80
IV	59.45 a	34.94 a	24.51
V	58.23 a	34.19 a	24.04
VI	60.41 a	32.34 a	28.07

Letras desiguales indican diferencias estadísticas significativas (Fisher LSD  $p < 0.05$ )

El rango establecido por la OMS (1985) para el contenido de materia orgánica es de 30-70%, rango en el cual entran la composta de todos los tratamientos.

## 7.6 Madurez de la composta

### -Relación C/N

La tabla 14 se muestran los contenidos de carbono, nitrógeno y la relación C/N para cada uno de los tratamientos.

La norma técnica estatal NTEA-006-SMA-RS-2006 establece que la relación C/N para un compost maduro debe ser menor a 12, para ésta norma los únicos compost maduros serían los correspondientes a los tratamientos I (Hojas con extraíbles y estiércol), II (hojas sin extraíbles y estiércol).

Por otro lado la OMS (1985) y Domínguez (2010) indican que ésta relación debe ser menor a 20, por lo que los compost obtenidos de los tratamientos I, II, III, IV están dentro del rango de un compost maduro.

Los tratamiento V y VI correspondientes al composteo de aserrín y estiércol presentan relaciones de 22 y 21 respectivamente, valores que están fuera de los

rangos establecidos para un compost maduro, este aumento de la relación C/N de los tratamientos V y VI con respecto al resto se debe a que el aserrín es un material con un alto contenido de ligninas y celulosa, por lo que el carbón orgánico se encuentra en formas resistentes y no puede ser usado inmediatamente por los microorganismos (Domínguez, 2010; Corral, 2011).

La OMS (1985) también considera parámetros para el contenido de carbón orgánico el cual debe estar en un rango de 10-30% y el nitrógeno que debe estar en un rango de 0.1-1.8%. Todos los tratamientos entran en el rango establecido para porcentaje de carbón orgánico, no siendo así para el nitrógeno en el cual los tratamientos I y II están fuera de los rangos establecidos con 1.95 y 2.20% respectivamente, pero que no afecta en nada a la composta.

Tabla 14. Relación C/N al final del proceso de composteo.

Tratamiento	Carbono	Nitrógeno	Relación C/N
I	21.40	1.95	10.99
II	20.14	2.20	9.17
III	17.64	1.25	14.16
IV	18.71	1.24	15.03
V	17.83	0.81	21.88
VI	18.11	0.85	21.34

### **-Pruebas de germinación**

El análisis de varianza aplicado al IG de las compostas indicó que no hay diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos ( $p > 0.05$ ) (Tabla 15) independientemente si estos tenían o no extraíbles, excepto para las compostas de los tratamiento I y II correspondientes a hojas con y sin extraíbles respectivamente en donde el IG del tratamiento I fue el menor, debido a la presencia de sustancias extraíbles y altas conductividades eléctricas. De acuerdo al valor del IG de las compostas, estas se consideran maduras.

Tabla 15. Índice y porcentaje de germinación al final del proceso de composteo

Tratamiento	% Germinación	IG
I	88.33	170.09 c
II	90.83	206.56 a
III	92.50	226.31 ab
IV	87.50	219.81 ab
V	90.83	231.16 ab
VI	90.32	211.25 b

Letras desiguales indican diferencias estadísticas significativas (Fisher LSD  $p < 0.05$ )

Tiquia y Tam (1998) mencionan que con un IG de 80% ya no hay sustancias fitotóxicas y que la composta se considera madura, aunque otros autores consideran un IG mayor a 90% para asegurar que no hayan efectos adversos en los suelos (Guerrero, 2008; Ramírez, 2011, citados por Corral, 2011). Las compostas con un IG mayor al 100% indica la presencia de sustancias estimuladoras del crecimiento (Domínguez, 2010).

En esta investigación todos los tratamientos tuvieron valores superiores al 100% por lo que son aptos para su utilización en cultivos sin causar daños adversos., éstos índices altos indican que las raíces de las plántulas germinadas en los extractos aprovecharon los nutrientes de la composta y crecieron por arriba de las raíces de las plántulas control (agua destilada), resultados similares fueron los encontrados por Domínguez (2010) para compostas comerciales de restos vegetales de podas que también mostraron propiedades estimuladoras a la germinación, según este autor esto puede atribuirse a la presencia de fitohormonas como las auxinas.

Los índices de IG en las compostas de cedro rojo fueron superiores a los reportados por Corral (2011) en compostas de tallos y hojas de orégano, lo mismo ocurrió en compostas de residuos agroindustriales como el aserrín reportados por Varnero *et al.* (2006).

## 7.7 Propuesta de gestión

En los bosques al momento de realizar la extracción forestal, muchos de los nutrientes del suelo se van en el árbol, además de que facilita su erosión al dejarlo sin protección; por lo que es necesario adecuar métodos que permitan proteger al suelo y devolverle los nutrientes que pierde, consecuentemente la propuesta de gestión va dirigida a conservar la fertilidad del sitio al reciclar la biomasa que se desprende de las podas y darle un valor agregado a los residuos al evaluar sus características químicas.

### -Caracterización química

Los residuos forestales de *Cedrela odorata* tienen concentraciones superiores de azúcares reductores y concentraciones similares de holocelulosa en ramas y aserrín a la de las especies de *Eucalyptus camaldulensis* y *Pinus patula* en madera las cuales se perfilan con grandes expectativas para la producción de bioenergéticos (Tabla 16). En base a esta caracterización, el cedro rojo es ideal para la producción de bioenergéticos como el bioetanol, considerando que el material que utilizaría para este fin son residuos (ramas, aserrín, hojas), por lo que la producción maderera, que es el uso principal de la especie, no se vería afectada.

Tabla 16. Comparación de la biomasa lignocelulosica entre *Cedrela odorata* y valores de referencia.

Parámetro	<i>Eucalyptus c.</i>	<i>Pinus p.</i>	<i>Cedrela o.</i>
Celulosa	45.5*	48.7*	40.45***
Hemicelulosa	16.5*	32.7*	32.31***
Holocelulosa	62*	81.4*	72.76***
Lignina	26*	18.5*	31.6***
Azucars reductores	2.13**	1.9**	9***

Fuente: \* Gómez *et al.*, 2012; \*\*Gómez *et al.*, 2013; \*\*\* Valores obtenidos en esta investigación.

Sin embargo, Soto-Álvarez (2013), menciona que aunque se tengan las mejores condiciones de composición y proceso químico para la obtención de bioetanol a partir de subproductos forestales, el principal problema que se presenta son los altos costos de traslado del material al área de procesamiento y la reducción del tamaño de partícula al iniciar el proceso, lo cual los hace no viables desde un aspecto técnico y económico.

### **-Contenido de fenoles**

Frías-Campomanes *et al.*, (2013) menciona que para que sea redituable la obtención de polifenoles estos deben tener al menos un 5% de rendimiento neto como contenido de polifenoles, por lo que los residuos obtenidos en esta investigación están por debajo de este porcentaje, que los hace inviables desde un aspecto económico, sin embargo Almonte-Flores *et al.*, (2014) reporta que extractos polifenólicos de cedro rojo presentan actividad hipoglucemiante y reducción de colesterol en ratas, por lo que desde el punto de vista biológico los extractos de ramas y aserrín son de suma importancia, y al ser de un material de desecho se le daría un valor agregado, aún con el bajo rendimiento que presentan. Los desechos generados después de su extracción se llevarían a compostaje con la finalidad de cerrar el ciclo de generación.

### **-Proceso de composteo en materiales crudos y tratados**

De manera natural los residuos tienen una lenta descomposición por lo que uno de los objetivos del compostaje es la aceleración del proceso de descomposición e incorporación de materia orgánica al suelo, por otra parte los nutrientes son un factor que se pierde con las cortas finales por lo que las compostas procedentes de los residuos cubrirán este aspecto si no en su totalidad pero sí podrá reducir el uso de fertilizantes químicos que traen como consecuencia la contaminación y salinización del suelo. Las compostas procedentes de residuos de cedro rojo, cumplen con todos los parámetros de calidad establecidos por la OMS (1985), y con la mayoría de los que establece la NTEA-006-SMA-RS-2006 (Tabla 17).

Un mayor contenido de materia orgánica ayuda a que los árboles crezcan más rápido y más vigorosos, tal como se observó entre 3 árboles de cedro rojo de 2 años de edad, de la misma procedencia, con contenidos de materia orgánica diferentes; 5.4, 26.2 y 30% que mostraron alturas de 0.8, 1.3 y 2.4 m respectivamente durante el primer año de edad, al año siguiente las alturas fueron de 1.6, 1.9 y 3.1 m respectivamente (Tabla 18), donde ahora se sumaron además del contenido de MO, el espacio disponible para las raíces, (Figura 17).

Igualmente se revisó pH, conductividad y materia orgánica, los resultados se muestran en la tabla 18. Donde se puede observar que aquellos con alto contenido de materia orgánica y bajo pH alcanzaron una altura superior al de los otros árboles.

Tabla 17. Parámetros de la composta de residuos de cedro rojo en comparación con valores de referencia.

Parámetro	Tratamiento						Referencia
	I	II	III	IV	V	VI	
pH	7.60	7.06	8.97	9.10	9.01	9.03	6-9
MO	40%	36%	33%	35%	34%	32%	30-70%
C	21%	20%	18%	19%	18%	18%	10-30%
N	1.95%	2.20%	1.25%	1.24%	0.81%	0.85%	0.1-1.8%
Relación C/N	11%	9%	14%	15%	22%	21%	< 20

Fuente: OMS, 1985; NTEA-006-SMA-RS-2006



Parte superior árboles de 1 año de edad. Parte inferior mismos árboles con 2 años de edad

Figura 17. Comparación física entre árboles de cedro rojo.

Tabla 18. Características químicas y físicas del suelo donde se encuentran sembrados los árboles de cedro rojo.

Muestra	pH	Conductividad (ms/cm)	M.O.	Altura del árbol en m	
				1er año	2do año
Suelo	7.89	0.317	5.36%	0.8	1.6
Tierra maceta	7.95	1.032	26.19%	1.2	1.9
Tierra de maceta	7.21	1.010	30.06%	2.4	3.1

**-Plan de Gestión:**

Considerando las descripciones previas:

Se propone se establezca dentro del plan de manejo de la plantación, la incorporación de los restos de poda + estiércol (mínimo 3 ton/ha) con ayuda de un tractor, para mejorar el contenido de materia orgánica que como se señaló, puede aumentar de manera considerable la altura de los árboles y si el fin de la plantación es obtener madera, esto influya en un menor tiempo de recuperación de la inversión realizada.

Una razón más para reciclar el material de poda es evitar la contaminación al suelo por utilizar agroquímicos, sumado un aumento en los costos de producción.

Si las condiciones locales son adversas, el contenido de extraíbles es mayor, por lo que los residuos de podas, sobre todo las hojas, pueden ser usadas para obtenerlos así como de las ramas y aserrín para obtener fenoles, el mercado de esto es algo incierto, porque este trabajo es pionero en la revisión de los compuestos que contiene el cedro rojo, que ayudan a mitigar diversas patologías, como lo menciona la etnobotánica. Lo que si se observó es que dichos compuestos son mayores en los lugares con climas adversos.

Por último, el usar los residuos de poda para hacer composta, ésta puede ser devuelta al sitio o ser usada en la producción de cedro rojo en viveros disminuyendo con esto sus costos ya que se usan comúnmente sustratos como: turba, perlita y vermiculita que tienen un alto valor comercial, por lo que si se sustituyen por la composta sería una excelente opción.

---

## VIII CONCLUSIONES

La caracterización química de las ramas y aserrín de cedro rojo presentan similitud en cuanto a su contenido de extraíbles, con diferencia estadística respecto a las hojas, que tienen una concentración mayor.

Las ramas y el aserrín presentaron altos contenidos de holocelulosa, similares a especies forestales con viabilidad para la obtención de bioetanol, por lo que desde el punto de vista químico los residuos de cedro rojo podrían considerarse es una opción para la producción de bioenergéticos.

Las ramas y el aserrín presentan altas concentraciones de polifenoles, pero es bajo el rendimiento de extracción de los mismos. Presentan también alta capacidad captadora de radicales libres.

La presencia o ausencia de extraíbles en ramas y aserrín no afectó el proceso de compostaje, en las hojas el material sin extraíbles favoreció el proceso.

La concentración de lignina no presentó diferencias estadísticas entre los materiales, al evaluar las compostas aparentemente este parámetro no obstaculizó el proceso de composteo.

El compostaje de residuos es una excelente opción para el aprovechamiento de residuos forestales ya que se obtuvieron compostas maduras en 4 meses.

De acuerdo a la NTEA-006-SMA-RS-2006 y la OMS (1985) los compost obtenidos a partir de los residuos de cedro rojo son de buena calidad.

Un sitio con mayor precipitación y alto contenido de materia orgánica puede dar árboles que alcanzan su crecimiento en un menor, pero son bajos sus contenidos de extraíbles. Ocurre lo contrario en condiciones adversas, donde los extraíbles son mayores. Una opción para bajar los costos de producción es reciclar los residuos en el lugar con lo que se puede acelerar el crecimiento de los árboles.

## IX RECOMENDACIONES

Realizar la cuantificación de los residuos generados en las plantaciones para establecer una propuesta económica de gestión.

Realizar un análisis cualitativo de extraíbles de las hojas de cedro rojo ya que por el alto porcentaje que se obtuvo puede contener otras sustancias económicamente viables. Probar estos extraíbles en áreas biológicas.

Utilizar procesos presurizados para la obtención de polifenoles, para mejorar los rendimientos de extracción.

El IG obtenido en los compost indica que el tiempo de compostaje se puede reducir por lo que es recomendable realizar bioensayos de germinación cada semana después de los tres meses de compostaje para establecer el tiempo óptimo del proceso ya que con 125 días de compostaje se obtuvieron IG por arriba del 100%.

Hacer un análisis de beneficio costo sobre la posible manera de aprovechar integralmente los residuos forestales de esta especie para fines de producción de bioenergía o sustratos para la fertilización del suelo.

---

---

## X BIBLIOGRAFÍA

- ✓ Avendaño, D. 2003. El proceso de compostaje. Pontificia Universidad Católica de Chile. Facultad de agronomía e ingeniería forestal, departamento de fruticultura y etnología. Santiago de Chile. 38 pp.
- ✓ Álvarez, A.; Pizarro, C.; Folgueras, M.B. 2013. Caracterización química de biomasa y su relación con el poder calorífico. Universidad de Oviedo departamento de energía.
- ✓ Álvarez-Castillo, A.; García-Hernández, E.; Domínguez-Domínguez, M.M.; Granados-Baeza, J.M.; Aguirre-Cruz, A.; Carmona-García, R.; Morales-Cepeda, A.; Herrera-Franco, P.J.; Licea-Claveríe, A.; Mendoza-Martínez, A.M. 2012. Aprovechamiento integral de los materiales lignocelulosicos. Revista iberoamericana de polímeros, vol. 13 (4). 140-150 pp.
- ✓ Almonte-Flores, D.C.; Paniagua-Castro, N.; Escalona-Cardoso, G.; Rosales-Castro, M.; 2014. Evaluation of the Antioxidant Capacity, Hypoglycemic Hypocholesterolemia and Genotoxic Properties of Polyphenolic extracts of *Cedrela odorata* L. and *Juglans regia* L. Barks in rodents. En proceso de publicación.
- ✓ Barrena G. 2006. Compostaje de residuos sólidos orgánicos. Aplicación de técnicas respirométricas en el seguimiento del proceso. Memoria de tesis, Universidad Autónoma de Barcelona. Barcelona, España. 315 pp.
- ✓ Chaplin, M.F.; Kennedy, J.F. 1986. Carbohydrate analysis a practical approach, Oxford Washington DC, IRL Press. 228 pp.
- ✓ CONAFOR (Comisión Nacional Forestal). 2010. Situación actual y perspectivas de las plantaciones forestales comerciales en México. México.

- ✓ CONAFOR (Comisión Nacional Forestal). 2012. Programa de desarrollo de plantaciones forestales a 15 años de su creación. México.
- ✓ Corral Torrecillas, L. C. 2011. Aprovechamiento de los residuos que se generan de la extracción del aceite esencial del orégano. Tesis de maestría, Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral regional Unidad Durango. CIIDIR-IPN. Durango, Mexico.88 pp.
- ✓ Dalzell, H.W; Biddlestone, A.J; Gray, K.R;Thurairajan, K. 1991. Manejo del suelo: Producción y uso del composte en ambientes tropicales y subtropicales. Boletín de suelos 56 de la organización de las naciones unidad para la agricultura y la alimentación. Roma.178 pp.
- ✓ Domínguez, A. 2010. Evaluación de las propiedades físicas, físico-químicas y de la fototoxicidad de compost comerciales para su uso en la formulación de sustratos de cultivo. Tesis profesional, Escuela superior de Barcelona, Barcelona, España. 142 pp.
- ✓ FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 2005. Situación de los bosques en el mundo. Roma, Italia.
- ✓ Farías-Campomanes, A. M.;Rostagno, M. A.; Meireles, M.A. 2013. Production of polyphenol extracts from grape bagasse using supercritical fluids: Yield, extract composition and economic evaluation. The Journal of Supercritical Fluids, vol. 77. 70-78 pp.
- ✓ Fernández, R.A. 2002. Estrategias para minimizar los impactos de la cosecha forestal. Balance de nutrientes y condiciones físicas del suelo. XVII Jornadas forestales de entre ríos. Concordia. 8 pp.

- ✓ Gómez, E.A.; Ríos, L.A.; Peña, J.D. 2012. Madera, un potencial material lignocelulósico para la producción de biocombustibles en Colombia. Información tecnológica. vol 23 (6). 73-86 pp.
- ✓ Gómez, E.A.; Ríos, L.A.; Peña, J.D. 2013. Efecto del pretratamiento de biomasa maderera en el rendimiento a etanol. Información tecnológica. vol 24 (5). 113-122 pp.
- ✓ Goya, J.F; Pérez, C; Frangi, J.L; Fernández, R. 2003. Impacto de la cosecha y destino de los residuos sobre la estabilidad del capital de nutrientes en plantaciones de *Pinus taeda* L. Ecología Austral vol. 13. 139-150 pp.
- ✓ Guarnizo, A.;Martinez, P.N.; Valencia, H.A. 2009. Pretratamientos de la celulosa y biomasa para la sacarificación. Scientia Et Technica, vol. 15 (42). 284-289 pp.
- ✓ Hamelinck, C.N.; Van Hooijdonk, G.; Fraaij, A.P. 2005. Etanol from lignocellulosic biomass: techno-economic performance in short, middle and long term. Biomass Bioenergy, vol. 28 (1). 384-410 pp.
- ✓ Haug R. 1993. The practical Handbook of Compost Engineering. Lewis Publishers. Boca Ranton, FL., USA. 717 pp.
- ✓ Honorato, A. 2007. Manual de procedimientos analíticos de laboratorio de química de la madera. INIFAP, campo experimental San Martinito, Puebla.
- ✓ IUCN, 2011. <http://www.iucnredlist.org/>. The IUCN Red List of Threatened Species. Consultado 17 de Julio 2013.

- ✓ Jiménez, N.; Londoño J.; Arango G.J. 2005. Actividad captadora de radicales libres y citotoxicidad de plantas colombianas de la familia *annonaceae*. Acta farm. Bonaerense vol. 24 (3). 337-342 pp.
  
- ✓ Lima, R.L. 2012. Evaluación de la composición química y propiedades físicas de madera y corteza de cuatro coníferas para la producción de bioenergía. Seminario de posgrado. Facultad de ciencias forestales. Universidad Autónoma de Nuevo León. 249-258 pp.
  
- ✓ López, F.; Alfaro, A.; Caparrós, S.; García, M.M.; Pérez, A.; Garrote, G. 2008. Aprovechamiento energético e integrado por fraccionamiento de biomasa lignocelulósica forestal y agroindustrial. Caracterización de hemicelulosa, celulosa y otros productos del fraccionamiento. No. 5. Boletín del CIDEU. ISSN 1885-5237. Huelva. 7-9 pp.
  
- ✓ López, S.E.; Musálem M.A. 2007. Sistemas agroforestales con cedro rojo, cedro nogal y primavera, una alternativa para el desarrollo de plantaciones forestales comerciales en los Tuxtlas, Veracruz, México. Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del medio ambiente, enero-junio. Vol. 13 (1). 59-66 pp.
  
- ✓ Márquez, A.C; Lora, O.F. 1999. Plantas medicinales de México II composición, usos y actividad biológica. México. UNAM. 35-37 pp.
  
- ✓ Monteiro, C.M. 2010. Situación de los biocombustibles de 2da y 3era generación en América latina y Caribe. Informe de la organización latinoamericana de energía y el instituto interamericano de cooperación para la agricultura. Consultado 5 de abril de 2013.

- 
- ✓ Morales Ortiz, E.R.; Herrera Tuz, L.G. CEDRO (*Cedrela odorata* L.) protocolo para su colecta, beneficio y almacenaje. Programa de germoplasma forestal de la Comisión Nacional Forestal
  
  - ✓ Martínez – Vento, N.; Estrada – Ortiz, J.; Góngora – Rojas, F.; López – Castilla, R.; Martínez – González, L. Curbelo – Gómez, S. 2010. Bioplaguicida de *Azadirachta indica* A. Juss (Nim) y la poda, una alternativa para el control de *Hypsipyla grandella* Zeller en plantaciones de *Cedrela odorata* L. revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente, vol. 16 (1). 61-68 pp.
  
  - ✓ OMS (Organización Mundial de la Salud). 1985. Manual para la elaboración de compost: bases conceptuales y procedimientos. Ginebra, Suiza.
  
  - ✓ Ramírez, G.C.; Vera, C.G.; Carrillo, A.F.; Magaña, O.S. 2008. El cedro rojo (*Cedrela odorata* L.) como alternativa de reconversión en terrenos abandonados por la agricultura comercial en el sur de Tamaulipas. Revista Agricultura técnica en México, vol. 34 (2). 243-250 pp.
  
  - ✓ Ramírez, P.C. 2010  
(<http://www.mailxmail.com/curso/vida/residuosmadereros/capitulo4.htm>)  
Fundamento químico y tecnológico para el tratamiento del follaje,  
Universidad de Leningrado. Consultado 14 de noviembre de 12.
  
  - ✓ Rosales, C.M.; Gonzalez, R.F. 2003. Comparacion del contenido de compuestos fenólicos en la corteza de ocho especies de pino. Maderas y bosques, vol 9 (2). 41-49 pp.

- 
- ✓ Rosales, C.M.; Pérez, M.E.; Ponce R. M. 2006. Propiedades antirradicales libres y antibacterianas de extractos de corteza de pino. *Revista maderas y bosques*, vol. 12 (1). 37-49 pp.
  - ✓ Rosales-Castro, M.; González-Laredo, R.; Rocha-Guzmán, N.E. 2009. Evaluación química y capacidad antioxidante de extractos polifenólicos de cortezas *Pinus cooperi*, *P. engelmannii*, *P. leiophylla* y *P. teocote*. *Revista maderas y bosques* vol. 15 (3). 87-105 pp.
  - ✓ Ramos, L.E.; Castañeda, C.; Ibáñez V.L. 2008. Evaluación de la capacidad antioxidante de plantas medicinales peruanas nativas e introducidas. *Revista Acad. Perú Salud* vol. 15 (1). 42-46. pp.
  - ✓ Rebottaro, S.; Cabrelli, D.; Valente, A.; Acqualagna, A. 2010. Producción y uso potencial de residuos forestales en poblaciones de *Pinus elliottii* bajo diferentes condiciones silvícolas. VI simposio internacional sobre manejo sostenible de recursos forestales. Buenos aires.
  - ✓ Sánchez, M. V.; Salazar, J.G; Hernández, V.J.; López, U.J.; Jasso, M.J. 2003. Parámetros genéticos y respuesta a la selección en características del crecimiento de *Cedrela odorata*, *Revista fitotec. Mex.* Vol. 26(1). 19-27 pp.
  - ✓ SEMARNAT, 2010. Norma oficial mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010. Protección ambiental-especies nativas de México de flora y fauna silvestres. categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio. Lista de especies en riesgo. Diario oficial los Estados Unidos Mexicanos. Secretaria del Medio ambiente y Recursos Naturales.
  - ✓ Soto-Álvarez, C.E. 2013. Análisis técnico para la obtención de etanol a partir de residuos de madera de pino. Tesis doctoral, Centro

---

Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral regional Unidad Durango. CIIDIR-IPN. Durango, México.

- ✓ Statistica ver 7.0 (stat. Soft. Inc. 1984-2004).
- ✓ Sztern D. y Pravia M.A. 1999. Manual para la elaboración de compost bases conceptuales y procedimientos. Organización panamericana de la salud. Organización Mundial de la Salud. 69pp.
- ✓ Taiz L.; Zeiger E. 2006. Fisiología vegetal volumen 1 Universitat Jaume. 580 pp.
- ✓ Tiquia S. y Tam N. (1998). Elimination of phytotoxicity during co-composting of spent pig-manure sawdust litter and pig sludge. Bioresorce Technology. No. 65. 43-49 pp.
- ✓ Velázquez, M.A. 2010. Situación actual y perspectivas de las plantaciones forestales comerciales en México. Boletín de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR)
- ✓ Velázquez M.B. 2006. Situación de los sistemas de aprovechamiento de los residuos forestales para su utilización energética. Revista ecosistemas, vol. 15 (1). 77-88 pp.
- ✓ Varnero, M.T.; Rojas, C.; Orellana, R. 2006. Índices de fitotoxicidad en residuos orgánicos durante el compostaje. R.C. suelo Nutr. Veg.. vol 7 (1). 28-37 pp.
- ✓ Vergara, T.J. 2004. Alternativas silvícolas para aumentar la rentabilidad de las plantaciones forestales. Revista Bosque, vol. 25 (2). 101-103 pp.

- ✓ Zhu, N.; Deng, Ch.; Xiong, Y.; Qian, H. 2004. Performance characteristic of tree aeration system in the swine manure composting. *Bioresource technology*, vol. 95 (3). 319-326 pp.

# ANEXOS

## ANEXO 1

### -Campos experimentales del INIFAP.



“El Palmar”

“San Felipe Bacalar”

### -Plantaciones forestales comerciales.



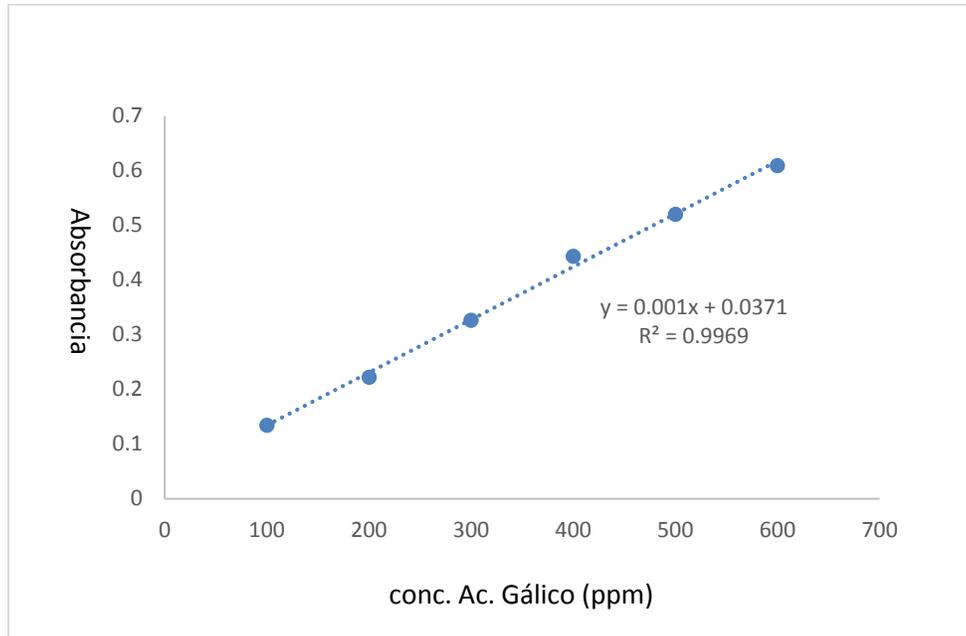
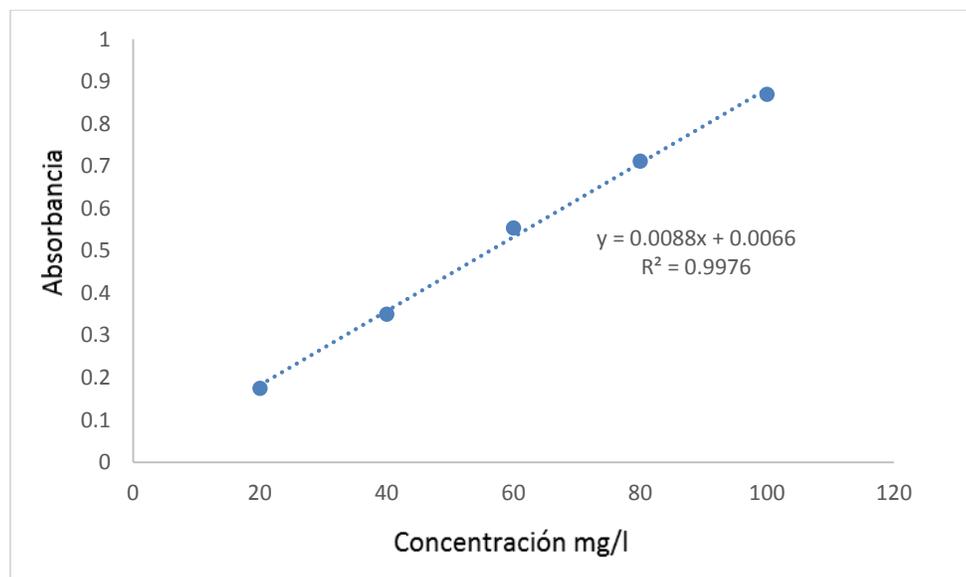
Plantación de 1 año San Felipe Bacalar, Quintana Roo.

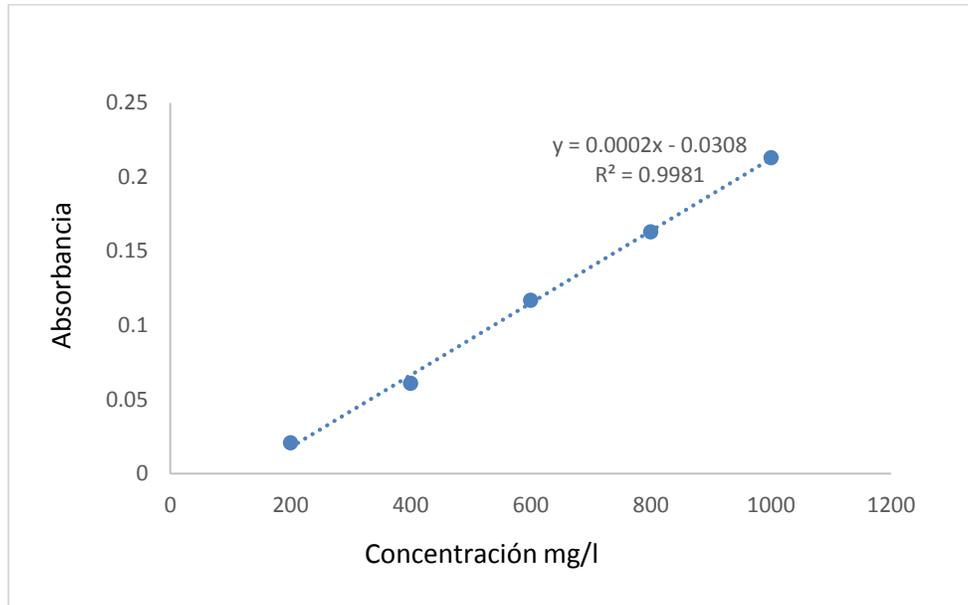


Plantación de 1 año El Palmar, Veracruz.

**-Muestras analizadas de hojas y ramas.**



**ANEXO 2****-Curvas de calibración de ácido gálico para fenoles totales.****-Curva de calibración de glucosa para azúcares totales.**

**-Curva de calibración de glucosa para azúcares reductores.**

### ANEXO 3

**-Formulación de la composta resultante en 6 tratamientos con 3 repeticiones cada uno.**



**ANEXO 4****-Tablas de ANOVA para caracterización química.**

Tabla de ANOVA para extraíbles.

Effect	Degr. of Freedom	SS	MS	F	P
Tipo de material	1	8.98943	8.989434	463.1727	0.000004
Procedencia	1	0.35495	0.118317	6.0962	0.040021
Tipo de material*Procedencia	1	0.41557	0.138523	7.1373	0.029532
Error	9	0.09704	0.019408		

Tabla de ANOVA para holocelulosa

Effect	Degr. of Freedom	SS	MS	F	P
Tipo de material	1	7.99581	7.995805	179.9529	0.000000
Procedencia	1	2.71770	2.717695	61.1642	0.000027
Tipo de material*Procedencia	1	0.00433	0.004326	0.0974	0.762118
Error	9	0.39989	0.044433		

Tabla de ANOVA para celulosa

Effect	Degr. of Freedom	SS	MS	F	P
Tipo de material	1	9.67732	9.677321	130.6965	0.000001
Procedencia	1	1.29047	1.290465	17.4283	0.002395
Tipo de material*Procedencia	1	0.00022	0.000219	0.0030	0.957841
Error	9	0.66640	0.074044		

Tabla de ANOVA para hemicelulosa

Effect	Degr. of Freedom	SS	MS	F	P
Tipo de material	1	0.030094	0.030094	0.059288	0.813084
Procedencia	1	2.615752	2.615752	5.153345	0.049355
Tipo de material*Procedencia	1	0.019961	0.019961	0.039326	0.847212
Error	9	4.568249	0.507583		

Tabla de ANOVA para lignina.

Effect	Degr. of Freedom	SS	MS	F	P
Tipo de material	1	0.00457	0.004574	0.01745	0.897820
Procedencia	1	8.03724	8.037244	30.65939	0.000362
Tipo de material*Procedencia	1	0.09459	0.094589	0.36082	0.562868
Error	9	2.35932	0.262146		

Tabla de ANOVA para azúcares totales.

Effect	Degr. of Freedom	SS	MS	F	P
Tipo de material	1	9.37673	9.376732	193.1389	0.000000
Procedencia	1	0.27007	0.270067	5.5628	0.042703
Tipo de material*Procedencia	1	0.02564	0.025639	0.5281	0.485877
Error	9	0.43694	0.048549		

Tabla de ANOVA para azúcares reductores.

Effect	Degr. of Freedom	SS	MS	F	P
Tipo de material	1	9.63456	9.634562	120.5644	0.000002
Procedencia	1	0.59657	0.596566	7.4653	0.023139
Tipo de material*Procedencia	1	0.06238	0.062383	0.7806	0.399930
Error	9	0.71921	0.079912		

**-Tablas de ANOVA para composta.**

Tabla de ANOVA para extraíbles.

Effect	Degr. of Freedom	SS	MS	F	P
Tipo de material	5	0	0.00	0.000000	1.000000
Procedencia	5	315	63.00	0.003826	0.999997
Tipo de material*Procedencia	25	0	0.00	0.000000	1.000000
Error	73	1202067	16466.67		

Tabla de ANOVA para pH.

Effect	Degr. of Freedom	SS	MS	F	P
Tipo de material	5	14.4744	2.89489	46.8457	0.00
Procedencia	5	66.8537	13.37075	216.3684	0.00
Tipo de material*Procedencia	25	21.1607	0.84643	13.6971	0.00
Error	73	4.5111	0.06180		

Tabla de ANOVA para conductividad eléctrica.

Effect	Degr. of Freedom	SS	MS	F	P
Tipo de material	5	22.6772	4.53544	53.0121	0.000000
Procedencia	5	57.7094	11.54187	134.9060	0.000000
Tipo de material*Procedencia	25	20.3679	0.81472	9.5227	0.000000
Error	73	6.2455	0.08555		

Tabla de ANOVA para materia orgánica.

Effect	Degr. of Freedom	SS	MS	F	P
Tipo de material	5	97.3007	19.46015	535.7724	0.000000
Procedencia	5	5.9384	1.18769	32.6991	0.000000
Tipo de material*Procedencia	25	1.1093	0.04437	1.2217	0.251164
Error	73	2.6515	0.03632		