

Aprovechamiento de residuos madereros

Cuantificación, caracterización y valorización



Liliana Trinidad López Chalarca
Leidy Yaneth Vega Rodríguez
Carlos Daniel Rendón Colorado
Sebastián Tobón Rojas





Liliana Trinidad
López Chalarca



Leidy Yaneth
Vega Rodríguez



Carlos Daniel
Rendón Colorado



Sebastián
Tobón Rojas

Aprovechamiento de residuos madereros

Cuantificación, caracterización y valorización

Liliana Trinidad López Chalarca
Leidy Yaneth Vega Rodríguez
Carlos Daniel Rendón Colorado
Sebastián Tobón Rojas



López Chalarca, Liliana Trinidad, *et al.*

Aprovechamiento de residuos madereros: cuantificación, caracterización y valorización / Liliana Trinidad López Chalarca, Leidy Yaneth Vega Rodríguez, Carlos Daniel Rendón Colorado y Sebastián Tobón Rojas

1.^a edición. Corporación Universitaria Remington, Medellín, Colombia. 2019
Servicio Nacional de Aprendizaje (Sena)

344 p.; 16,5x23 cm

ISBN: 978-958-52376-3-6 (Impreso)

ISBN: 978-958-52376-4-3 (Internet-PDF)

1. Residuos de madera. 2. Pulpa de madera. 3. Industria de la madera. 4. Propiedades de la madera. 5. Productos de la madera. 6. Árboles maderables. 7. Tectona grandis. 8. Industria de la pulpa y el papel. 9. Madera como combustible. 10. Carbón vegetal. I. Autores. II. Tít.

CDD: 674.84 / L864

**© Corporación Universitaria Remington
Servicio Nacional de Aprendizaje (Sena)**

Primera edición, noviembre de 2019

Fondo Editorial Remington

Lina María Yassin Noreña, editora jefe
fondo.editorial@uniremington.edu.co
Calle 51 # 51-27, Edificio Uniremington
Telefax: (57) (4) 3221000, extensión 3001 - 3008
Medellín, Colombia

Coordinadora de procesos editoriales

Diana Cecilia Molina Molina

Diagramador editorial

Oscar Mauricio Morales Castrillón

Corrector de estilo

Juan David Villa Rodríguez

Impresión y terminados

Panamericana Formas e Impresos S.A.
Calle 65 # 95-28 Bogotá D. C.
Teléfonos: 4300355/4302110
Bogotá D. C., Colombia

Nota legal

Las opiniones expresadas por el autor no constituyen ni comprometen la posición oficial o institucional de la Corporación Universitaria Remington.

Todos los derechos reservados. Ninguna porción de este libro podrá ser reproducida, almacenada en algún sistema de recuperación o transmitida en cualquier forma o por cualquier medio –mecánicos, fotocopias, grabación y otro, excepto por citas breves en revistas impresas, sin la autorización previa y por escrito del Comité Editorial Institucional de la Corporación Universitaria Remington.

Agradecimientos

Los autores dan un especial agradecimiento a la autora Leidy Yaneth Vega por su dedicación en la compilación y desarrollo de la presente obra. Igualmente, agradecen al Sistema de Investigación y Desarrollo Tecnológico (SENNOVA-SENA) por los recursos financiados para la elaboración del proyecto *Caracterización de residuos generados en la cadena productiva del sector maderero para su aprovechamiento*, con número SIGP 19933, de 2015, y a los estudiantes Mauricio Quiceno Cano, María Isabel Gutiérrez Figueroa y Juan Pablo Bedoya Pabón. También agradecen al grupo de investigación Termodinámica Aplicada y Energías Alternativas (Tayea) y al Laboratorio Ciencias de la Energía de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, por los espacios y recursos facilitados para el desarrollo experimental en torrefacción, combustión y gasificación, así como al profesor Juan Carlos Sierra Mondragón y al Laboratorio de Productos Forestales de la Universidad Nacional de Colombia por su constante asesoría en la cuantificación de desechos madereros y selección de especies maderables. Finalmente, extienden su agradecimiento a las empresas que suministraron el material de residuos de madera para los análisis experimentales: Reforestadora La Argentina, Tablemac, Bio-estibas, Bosquema, Pizano, Madepátula y Núcleos de Madera.

Autores

Liliana Trinidad López Chalarca

Ingeniera química con maestría en Ingeniería Química de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Estudiante de Doctorado en Ingeniería de Materiales en la Universidad de Antioquia. Más de ocho años de experiencia en el área de investigación, durante los cuales ha participado en diferentes proyectos sobre almacenamiento de energía, eficiencia energética, energías alternativas, desarrollo y caracterización de materiales y optimización de procesos. Ha publicado artículos en revistas internacionales indexadas como la *Energy&Fuel.2015*; además, ha colaborado en la elaboración de libros resultado de investigación. Correo electrónico: ltlopez86@misena.edu.co

Leidy Yaneth Vega Rodríguez

Ingeniera Química de la Universidad Nacional de Colombia. Integrante activa del grupo de investigación Termodinámica Aplicada y Energías Alternativas (Tayea), adscrito a la Facultad de Minas de la misma institución. Ha participado en diversos proyectos de investigación sobre procesos termoquímicos, especialmente torrefacción. Posee habilidades y conocimiento en técnicas instrumentales de caracterización por análisis próximo, último y termogravimetría. Algunos de sus artículos son los siguientes: “*Evaluation of the potential of wood wastes in energy applications*” y “*Study of reactivity reduction in sugarcane bagasse as consequence of a torrefaction process*”. Correo electrónico: lyvegar@unal.edu.co

Carlos Daniel Rendón Colorado

Ingeniero mecánico de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Cuenta con experiencia en las áreas de diseño mecánico, soldadura y mantenimiento aplicadas a la industria, en la cual se ha desempeñado como ingeniero e investigador. Actualmente forma parte del Centro Tecnológico del Mobiliario-SENA, donde ejerce el rol de investigador e instructor en diseño, desarrollo y mejoramiento de materiales, productos y procesos. Algunos resultados de sus investigaciones en diseño son la participación en dos registros de diseño industrial ante la Superintendencia de Industria y Comercio de Colombia. Correo electrónico: cdrendon2@misena.edu.co.

Sebastián Tobón Rojas

Ingeniero biológico de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Estudiante de la maestría en Ciencia y Tecnología de Alimentos de la Universidad Nacional de Colombia. Adscrito al grupo de investigación Materiales para el Mobiliario, MATERMOB. Ha participado en proyectos de biotecnología y bioprocesos relacionados con la madera y sus subproductos, identificación de hongos y bacterias nativas con actividad lignocelulósica, y obtención de adhesivos naturales. Actualmente forma parte del Centro Tecnológico del Mobiliario-SENA, donde ejerce el rol de Investigador SENNOVA, en las áreas de ambiental, biotecnología y bioprocesos. Correo electrónico: stobon3@misena.edu.co

Tabla de Contenido

Resumen	21
Introducción	23
Capítulo 1	
Cuantificación de residuos generados en los aserríos	25
1. Evaluación cualitativa y cuantitativa	25
Referencias bibliográficas	36
Capítulo 2	
Selección de maderas de estudio	39
1. Criterios de selección de especies de estudio	39
2. Descripción del proceso de selección	40
3. ¿Por qué analizar y caracterizar al <i>Pinus patula</i> , la <i>Tectona grandis</i> y la <i>Acacia mangium</i> ?	45
Referencias bibliográficas	46
Capítulo 3	
Generalidades de especies maderables	47
1. Estructura de un árbol	47
2. Generalidades del Pino pátula	52
• Taxonomía	52
• Descripción botánica	53
• Origen y distribución geográfica	53
- Condiciones de cultivo y adaptación	54
- Enfermedades, insectos y otros agentes dañinos	54

• Características y propiedades de la madera	55
- Composición química	55
- Propiedades físico-mecánicas	56
• Usos finales y aplicaciones	57
- Ambiental	57
- Medicinal/farmacéutico	57
- Productos maderables	58
- Industria química	58
- Producción de carbón y leña	58
3. Generalidades de la <i>Acacia mangium</i>	58
• Taxonomía	59
• Descripción botánica	59
• Origen y distribución geográfica	60
- Condiciones de cultivo y adaptación	61
- Enfermedades de insectos y otros agentes dañinos	61
• Características y propiedades de la madera	62
- Composición química	62
- Propiedades físico-mecánicas	63
• Usos finales y aplicaciones	64
- Alimentación	64
- Pasta de papel, papel <i>kraft</i> y pulpa química	64
- Medicinal/farmacéutico	65
- Ambientales	65
- Combustible	65
- Productos maderables	66
4. Generalidades de la <i>Tectona grandis</i>	66
• Taxonomía	66
• Descripción botánica	66
• Origen y distribución geográfica	67
- Condiciones de cultivo y adaptación	68
- Enfermedades de insectos y otros agentes dañinos	68
• Características y propiedades de la madera	69
- Composición química	69
- Propiedades físico-mecánicas	70

• Usos finales y aplicaciones	71
- Ornamental	71
- Medicinal/farmacéutico	72
- Combustible.....	72
Referencias bibliográficas	73

Capítulo 4

Aplicaciones energéticas de la madera

1. Generación de calor y electricidad.....	83
• Combustión directa	84
• Gasificación.....	85
• Pirólisis rápida	87
• Digestión anaeróbica (AD).....	89
2. Producción de biocombustibles para el transporte.....	91
• Fermentación	91
• Transesterificación.....	93
• Gasificación combinada con la síntesis de Fischer-Tropsch (FTS)	94
3. Síntesis de productos químicos industriales	96
4. Influencia de la composición físico-química de la madera	100
• Composición química.....	102
• Análisis último	102
• Análisis próximo	103
• Propiedades físicas	107
• Análisis lignocelulósico.....	109
5. Caracterización de productos con base en su uso final	111
• Biochar.....	113
• Biogás.....	115
• <i>Syngas</i>	117
• Bioaceite	119
• Biodiésel	121
• Bioetanol.....	123
Referencias bibliográficas	125

Capítulo 5

Aplicaciones biotecnológicas de los residuos madereros.....135

1. Elaboración de pulpa para papel	136
• Biopulpado.....	139
• Bioblanqueamiento.....	142
• Parámetros para la producción de la pulpa.....	143
2. Elaboración de pulpa para fibras textiles	149
• Obtención de pulpa disuelta.....	152
• Obtención de fibras textiles: el rayón.....	159
• Otros productos de interés obtenidos a partir de la pulpa disuelta.....	167
3. Obtención y aplicación de taninos	169
• Taninos condensados	170
• Taninos hidrolizables.....	171
• Elaboración de adhesivos basados en taninos	174
• Elaboración de bioadsorbentes a partir de taninos	179
Referencias bibliográficas	189

Capítulo 6

Otras aplicaciones para residuos de madera.....199

1. Tableros a base de madera.....	200
• Tableros de partículas.....	206
• Tableros de fibras.....	212
• Tableros de virutas orientadas	219
• Tableros alistonados	226
2. Materiales compuestos	234
• Compuestos a base de matriz cerámica (CMC)	235
• Compuestos a base de matriz polimérica (PMC).....	247
3. Compostaje	259
4. <i>Pellets</i> de madera.....	266
5. Carbones activados	277
Referencias bibliográficas	286

Capítulo 7

Metodología y experimentación	297
1. Recolección de las muestras	297
2. Preparación preliminar de las muestras	298
3. Métodos analíticos evaluados	299
• Análisis último o elemental	299
• Análisis próximo	300
• Análisis lignocelulósico	302
• Determinación de extractivos	303
• Determinación del contenido de humedad	304
• Determinación de poder calorífico superior	304
• Determinación de densidad aparente	305
• Determinación de pH	306
4. Procesos de conversión termoquímica	306
• Torrefacción	306
• Gasificación	308
• Combustión	309
Referencias bibliográficas	310

Capítulo 8

Resultados y discusiones	313
1. Caracterización preliminar de los residuos madereros	313
• Análisis próximo, elemental y lignocelulósico	314
• Contenido de extractivos	320
• Densidad de las especies maderables	322
• pH de las especies maderables	325
2. Caracterización de madera torrefactada	327
3. Comportamiento del gas de síntesis obtenido vía gasificación	332
4. Pruebas de reactividad	337
Referencias bibliográficas	340

Lista de Figuras

• Figura 1-1. Residuos generados por la cadena de valor forestal-madera	27
• Figura 1-2. Tipos de residuos generados en los procesos de transformación primaria de la madera: virutas, chips, aserrín, despuntes, orillos y corteza	30
• Figura 1-3. Porcentaje aproximado de madera aserrada y de residuos producidos en los procesos más comunes de un aserrío	34
• Figura 3-1. Sección transversal de un tronco de madera	48
• Figura 3-2. Estructura molecular de un tallo	50
• Figura 4-1. Transformación de la madera desde su origen hasta su uso final en aplicaciones energéticas	80
• Figura 4-2. Proceso de combustión directa de madera a electricidad.	84
• Figura 4-3. Sistema de cogeneración de madera para electricidad.	85
• Figura 4-4. Gasificación de madera y aprovechamiento de productos generados.	86
• Figura 4-5. Productos obtenidos bajo específicas condiciones de pirólisis y su uso final	87
• Figura 4-6. Proceso para la obtención de biogás a partir de digestión anaeróbica	90
• Figura 4-7. Ruta bioquímica para producción de etanol a partir de biomasa lignocelulósica.	92
• Figura 4-8. Proceso de gasificación Fischer-Tropsch para obtener combustibles, electricidad y productos químicos	95
• Figura 4-9. Propiedades de la madera que influyen en procesos termoquímicos	101
• Figura 4-10. Distribución de productos de cada componente de la madera	110
• Figura 5-1. Proceso de obtención química de la pulpa y del papel	137
• Figura 5-2. Proceso de biopulpado	140
• Figura 5-3. Clasificación de las fibras textiles	151
• Figura 5-4. Esquema general del proceso de obtención de celulosa empleando el método de prehidrólisis <i>kraft</i>	154
• Figura 5-5. Proceso de producción de pulpa empleando el método ácido sulfito	155

• Figura 5-6. Modificación del proceso de obtención de celulosa para la elaboración de fibras empleando un tratamiento enzimático	157
• Figura 5-7. Mecanismo de acción del grupo enzimático de las xilanasas sobre la cadena de hemicelulosa facilitando la liberación de pentosas	158
• Figura 5-8. Mecanismo del grupo enzimático de las mananasas sobre la cadena de hemicelulosa	159
• Figura 5-9. Proceso de la producción de rayón a partir de la pulpa disuelta.	163
• Figura 5-10. Productos obtenidos a partir de la pulpa disuelta.	168
• Figura 5-11. Estructura del flavonoide	170
• Figura 5-12. Composición de los taninos condensados	171
• Figura 5-13. Estructuras químicas de los componentes principales de los taninos hidrolizables, ácido gálico, y ácido elágico	172
• Figura 5-14. Estructura básica de un tanino hidrolizable	172
• Figura 5-15. Esquema general del mecanismo de adsorción de Cr(VI) por un gel de tanino.	180
• Figura 5-16. Acercamiento al mecanismo de gelificación de un tanino con formaldehído.	181
• Figura 6-1. Formas más comunes de los residuos de la madera, desde el más grande hasta el más pequeño	201
• Figura 6-2. Tipos de tableros a base de madera	203
• Figura 6-3. Clasificación de tableros de madera según materia prima, densidad relativa, densidad aparente y tipo de proceso	204
• Figura 6-4. Ciclo de vida de los tableros a base de madera	205
• Figura 6-5. Partículas para tableros aglomerados.	207
• Figura 6-6. Tableros de partículas con caras laminadas	207
• Figura 6-7. Proceso de fabricación tablero de partículas	208
• Figura 6-8. Decoración de interiores con tableros de partículas.	209
• Figura 6-9. Tableros de fibras.	212
• Figura 6-10. Fibra típica para fabricación de tableros MDF.	213
• Figura 6-11. Proceso de fabricación de tableros de fibras	214
• Figura 6-12. Aplicaciones tableros de fibras	217
• Figura 6-13. Virutas para fabricación de tableros OSB	220
• Figura 6-14. Tableros de virutas orientadas	221
• Figura 6-15. Tableros OSB utilizados en construcción residencial	222

• Figura 6-16. Proceso de fabricación de un tablero OSB.	223
• Figura 6-17. Materia prima para tableros alistonados	226
• Figura 6-18. Disposición de los listones en un tablero alistonado	227
• Figura 6-19. Flexión en las tablas anchas y en los listones	227
• Figura 6-20. Tablero alistonado multicapa	228
• Figura 6-21. Uniones <i>finger joint</i>	229
• Figura 6-22. Proceso productivo para la fabricación de tableros alistonados	230
• Figura 6-23. Control de posición de listones en etapa de prensado	231
• Figura 6-24. Usos comunes de los tableros alistonados	233
• Figura 6-25. Tipos de refuerzo de los CMC	236
• Figura 6-26. Sectores y aplicaciones típicas de los CMC	237
• Figura 6-27. Evolución de los CMC en aplicaciones con énfasis aeroespacial	237
• Figura 6-28. Materia prima para compuestos madera-cemento.	238
• Figura 6-29. Tableros de madera-cemento	239
• Figura 6-30. Esquema del proceso de fabricación de fibro-cemento	240
• Figura 6-31. Fachada de una casa elaborada con tableros madera-cemento	241
• Figura 6-32. Tipos de tableros de madera-cemento.	242
• Figura 6-33. Sectores y aplicaciones típicas de los PMC	249
• Figura 6-34. Sectores de aplicación en tendencia de los PMC.	250
• Figura 6-35. Fases de un compuesto WPC	250
• Figura 6-36. Materia prima para elaboración de WPC	251
• Figura 6-37. Ventajas de los WPC respecto a los materiales de composición.	252
• Figura 6-38. Clasificación de los materiales compuestos madera-plástico WPC	253
• Figura 6-39. Flujo de proceso de producción de los WPC utilizando técnica de extrusión.	253
• Figura 6-40. Aplicaciones típicas de los WPC	255
• Figura 6-41. Proceso tradicional de biodegradación del <i>compost</i>	260
• Figura 6-42. Diagrama de flujo para obtención de <i>compost</i>	260
• Figura 6-43. Producción de <i>compost</i> en la industria.	261

• Figura 6-44. <i>Pellets</i> de madera	267
• Figura 6-45. <i>Pellets</i> fabricados a partir de distintas materias primas	268
• Figura 6-46. Flujo de proceso para elaboración de <i>pellets</i> de madera	269
• Figura 6-47. Usos típicos de <i>pellets</i> de madera	271
• Figura 6-48. Costos de combustible para calentamiento residencial (centavos/kWh)	272
• Figura 6-49. Proyección del consumo mundial de <i>pellets</i>	273
• Figura 6-50. Proyección de la producción mundial de <i>pellets</i>	274
• Figura 6-51. Tipos de poros en el carbón activado	278
• Figura 6-52. Flujo de proceso para la producción de carbón activado	279
• Figura 6-53. Tipos comerciales de carbón activado	280
• Figura 6-54. Aplicaciones típicas del carbón activado	281
• Figura 6-55. Conversión de subproducto maderero a carbón activado	282
• Figura 7-1. Curva termogravimétrica usada para análisis próximo	301
• Figura 7-2. Etapas del proceso y rampa de calentamiento utilizada en el proceso de torrefacción	307
• Figura 7-3. Esquema experimental de pruebas de gasificación en reactor horizontal	308
• Figura 7-4. Esquema experimental de combustión en TGA	310
• Figura 8-1. Residuos de madera	313
• Figura 8-2. Residuos de madera torrefactados	328
• Figura 8-3. Diagrama Van Krevelen para residuos de madera crudos y torrefactados	330
• Figura 8-4. Análisis próximo para residuos de madera crudos y torrefactados	331
• Figura 8-5. Composición del <i>syngas</i>	334
• Figura 8-6. Muestras de residuos de madera bajo condición de combustión a velocidad de calentamiento 10°C/min	338
• Figura 8-7. A. Distribución de la energía de activación por método isoconversional de Ozawa. B. Velocidad de reacción e índice de reactividad para residuos de madera en un proceso de combustión	339

Lista de Tablas

• Tabla 1-1. Tipos de residuos según la etapa del proceso de aserrado	33
• Tabla 2-1. Consumo de especies en el sector maderero	40
• Tabla 2-2. Productos considerados como mobiliario	42
• Tabla 2-3. Empresas del sector que cumplen con todos los filtros aplicados	43
• Tabla 3-1. Típica composición química de <i>Pinus patula</i> . Expresados en porcentaje	55
• Tabla 3-2. Composición química de especies de <i>Acacia mangium</i>	63
• Tabla 3-3. Composición química de la <i>Tectona grandis</i>	70
• Tabla 4-1. Rendimiento de productos de los principales componentes en pirolisis	110
• Tabla 4-2. Principales propiedades de biocombustibles	112
• Tabla 4-3. Caracterización del biochar	114
• Tabla 4-4. Propiedades y requerimientos del biogás dependiendo de su utilización	116
• Tabla 4-5. Especificaciones del <i>syngas</i> requeridas para una aplicación final	118
• Tabla 4-6. Propiedades típicas de bioaceite derivado de madera	119
• Tabla 4-7. Requerimientos detallados por la Norma ASTM D7544 para uso de bioaceite en quemadores	120
• Tabla 4-8. Especificaciones del biodiésel bajo las normas ASTM D6751 y EN 14214	121
• Tabla 4-9. Especificaciones del etanol bajo las normas ASTM D4806-D5798 y EN 13576	123
• Tabla 5-1. Rendimientos de los procesos de pulpado y características y usos de la pulpa obtenida	139
• Tabla 5-2. Longitud de fibra y su aplicación en la elaboración de papel	147
• Tabla 5-3. Parámetros determinantes para la elaboración de papel derivados de la morfología de la fibra	148
• Tabla 5-4. Rendimiento de la madera en la obtención de diferentes pulpas comerciales	153
• Tabla 5-5. Porcentaje de hemicelulosa presente en algunos productos derivados de la pulpa disuelta	165

• Tabla 5-6. Relación entre los parámetros rendimiento del extracto, fenoles y taninos condensados	176
• Tabla 5-7. Número Stiasny de extractos de cortezas de diferentes especies empleados para la producción de taninos	178
• Tabla 5-8. Diferentes adsorbentes relacionados con su respectivo adsorbato y su capacidad de adsorción de diferentes contaminantes y metales	183
• Tabla 5-9. Especies empleadas y con aplicación industrial en el mundo de acuerdo con su composición de taninos	185
• Tabla 6-1. Clasificación de tableros a base de madera	202
• Tabla 6-2. Usos finales estructurales para tableros OSB en condiciones secas.	222
• Tabla 6-3. Clasificación de los tableros alistonados	231
• Tabla 6-4. Tipos de tableros de madera-cemento.	242
• Tabla 6-5. Comparación de las características de las matrices termoestables y termoplásticas.	248
• Tabla 6-6. Ventajas de la utilización de los <i>pellets</i>	270
• Tabla 6-7. Estándares de los <i>pellets</i> dependiendo de su uso final	272
• Tabla 7-1. Porcentaje de humedad de las especies al recibir las	298
• Tabla 8-1. Caracterización de residuos de madera de diferentes especies	315
• Tabla 8-2. Composición química de las especies analizadas y del grupo al cual pertenecen, latifoliadas y coníferas	317
• Tabla 8-3. Parámetros obtenidos para residuos provenientes de la especie <i>Tectona grandis</i>	320
• Tabla 8-4. Parámetros obtenidos para los residuos provenientes de la especie <i>Acacia mangium</i>	321
• Tabla 8-5. Parámetros obtenidos para los residuos provenientes de la especie <i>Pinus patula</i>	321
• Tabla 8-6. Contenido de humedad en probetas.	322
• Tabla 8-7. Datos de masa y dimensiones de las probetas en estado anhidro	324
• Tabla 8-8. Resultados de densidad anhidra de especies.	324
• Tabla 8-9. Resultados de medición de pH	326
• Tabla 8-10. Análisis próximo y elemental de residuos de madera torrefactados	328
• Tabla 8-11. Rendimiento de gas rico en hidrógeno obtenido de gasificación de madera con vapor de agua en un reactor cilíndrico horizontal	335

Resumen

La gran disponibilidad de residuos madereros que hoy tiene Colombia es un importante motor que impulsa la búsqueda de sistemas de producción sostenibles que apunten a convertir estos desechos en productos valiosos para diferentes sectores económicos del país. Este libro expone las características principales de las tres especies de maderas que predominan en la industria nacional (*Tectona grandis* o Teca, el *Pinus patula* o Pino y la *Acacia mangium*), caracteriza sus residuos e identifica su potencial en términos físicos, químicos y térmicos; esto último, con el fin de darle un valor agregado que haría posibles otros usos.

La madera caracterizada estuvo delimitada por parte interna (compuesta de albura y duramen) y parte externa o corteza; los resultados de ambas fueron diferenciados. Dentro de los análisis físicos realizados se incluye la determinación de la densidad, el pH y la humedad. Los análisis químicos comprenden el análisis último, próximo, lignocelulósicos y extractivos. Para realizar el análisis térmico se realizó evaluación del poder calorífico, ensayos de torrefacción, gasificación y reactividad a unas muestras seleccionadas.

Los desechos de maderas pueden tener muchos usos: producción de biochar, *syngas* o bioaceite (aplicación energética), elaboración de biobulpa de papel y textil (aplicación biotecnológica), elaboración de bioadsorbentes y resinas, y otros usos como la elaboración de tableros de partículas, fibras o alistonados, desarrollo de materiales compuestos, compostaje, *pellets*, carbón activado, entre otros.

En los primeros tres capítulos del libro se exponen la cuantificación de los residuos madereros, la selección de las maderas por evaluar y las generalidades de las tres maderas seleccionadas. En los Capítulos 4, 5 y 6 se describen con profundidad las aplicaciones identificadas aplicables a los residuos de madera. En el Capítulo 7 se presenta la metodología de caracterización usada para las especies maderables seleccionadas. Finalmente, en el Capítulo 8 se abordan los resultados de la caracterización y la valoración de posibles aplicaciones para aprovechar los residuos de las respectivas maderas.

Este libro fue desarrollado para brindarle, principalmente al sector industrial maderero, un conocimiento más profundo sobre el manejo de los residuos obtenidos en la transformación primaria y secundaria de la madera, y sobre las diferentes opciones tecnológicas para su aprovechamiento. Esto permite generar un panorama claro acerca del potencial energético y biotecnológico de estos residuos y de su protagonismo como fuente sostenible; además, puede ser de interés para el sector educativo por su contribución futura a la recuperación de desechos de maderas.

Al final, el lector comprenderá que la gran disponibilidad de los residuos madereros de la que goza Colombia impulsa la búsqueda de aplicaciones alternativas sostenibles que apunten a convertir los residuos sin valor en materias primas valiosas para diversos sectores de la economía. Así mismo, el lector entenderá que la elección de una aplicación en particular depende principalmente de propiedades físico-químicas de la madera, requisitos del producto final, normas ambientales, condiciones económicas y factores específicos de la empresa.

Por otro lado, vale advertir que la heterogeneidad de la madera (consecuencia de la variabilidad climática, condiciones del suelo, la edad del árbol e, incluso, condiciones de transporte y almacenamiento y prácticas de cultivo y recolección), la disponibilidad del recurso en el país y su valor competitivo con respecto a otras materias primas limitan en cierta medida el uso de una especie maderable específica.

Introducción

Este libro presenta un acercamiento a diferentes aplicaciones que pueden llevarse a cabo a partir de los residuos generados en los procesos de transformación primaria y secundaria de la madera. En estos procesos se generan desperdicios que pueden oscilar entre el 40% y el 60% del total de la madera aserrada; de aquí la importancia de recuperar dichos residuos y usarlos en productos de mayor valor agregado para la industria maderera: aplicaciones energéticas y biotecnológicas, y convencionales como los tableros, el carbón activado, el compostaje, entre otros. Las valoraciones se hacen mediante un análisis de los resultados obtenidos de las caracterizaciones físicas, químicas y térmicas que se llevan a cabo en diferentes especies maderables.

El potencial energético mediante el procesamiento y utilización de residuos maderables fue estudiado con el fin de conocer el panorama y las expectativas de diversas aplicaciones frente a la necesidad de desarrollar nuevas formas de producción de energía renovable y sostenible, y, así, apuntar a su inclusión en más actividades económicas, comerciales e industriales, y en los diferentes sectores con una producción más limpia y eficiente.

En lo que respecta a las pulpas celulósicas, la inclusión de especies maderables que comúnmente no se emplean para dicho propósito (con la ayuda de una nueva herramienta biotecnológica como los hongos y sus procesos naturales) facilita, a su vez, su uso en un proceso industrial eficiente y eficaz, que no solo permite disminuir el consumo de químicos, lo que genera beneficios ambientales y económicos, sino que también permite una mayor refinación en los procesos y en el producto final gracias al uso de un agente con una tarea específica en la remoción de las hemicelulosas.

Por otro lado, el aprovechamiento de los compuestos químicos conocidos como taninos, presentes principalmente en las cortezas de los árboles, ha tenido un gran auge en los últimos tiempos para la sustitución de las resinas fenólicas-formaldehído, presentes en la gran mayoría de los adhesivos, con el objetivo de obtener productos menos contaminantes y menos

peligrosos para la salud humana; además, se usan en procesos de tratamientos de aguas, o biorremediación, para eliminar compuestos tóxicos de una manera ambientalmente amigable.

Así mismo, se evalúa el potencial de recuperación de otros productos de alto consumo en la industria a partir de la recuperación de los desechos de maderas, como lo son los materiales compuestos, el compostaje, los *pellets* y los carbones.

Las aplicaciones evaluadas en este libro, solo constituyen un abrebocas a los múltiples usos que les dan valor agregado a los residuos madereros y se presentan como nuevas oportunidades para trabajos a diferentes escalas, siempre en búsqueda de mejoras y optimizaciones tanto biotecnológicas como de procesos. Las especies madereras que se van a estudiar incluyen la *Tectona grandis* o Teca, el *Pinus patula* o Pino y la *Acacia mangium*, escogidas por la viabilidad que poseen respecto a la sostenibilidad, disponibilidad, accesibilidad y que impacta directamente en la productividad de los diferentes sectores industriales, principalmente enfocado en la industria del mobiliario en Colombia.

Cuantificación de residuos generados en los aserríos

1. Evaluación cualitativa y cuantitativa

La cadena productiva forestal-madera agrupa actividades y operaciones que se articulan técnica y económicamente desde el proceso de extracción o cultivo de árboles en bosques para obtener madera hasta su transformación para elaborar productos de alto valor agregado, como tableros, muebles y otros productos de madera comercializados en el mercado interno o en el exterior.^[1,2] La producción de madera se origina en plantaciones forestales o en bosques naturales nativos, ambos explotados, en muchos casos, sin ningún orden ni control. De la extracción de los bosques se obtiene la madera en rollo, que es transformada por la industria primaria (aserraderos) a través de procesos de aserrío, cepillado, secado y preservación o inmunizado, para obtener una madera aserrada y dimensionada, en tablones, tablas, listones, cerchas y vigas, que posteriormente serán insumos en la transformación secundaria para la elaboración de una amplia gama de productos para la construcción, comunicación, navegación y mobiliario, y para la producción de papel y cartón, entre otros.^[3] Conocer las operaciones del sector maderero es de gran importancia debido a que permite fortalecer la productividad actual y establecer nuevas políticas de calidad, desarrollo sostenible y competitividad.

En Colombia es difícil hablar de una industria de la madera: la mayoría de industrias de segunda y tercera transformación son micro, pequeñas y medianas empresas; también son pequeñas unidades productivas de carácter semindustrial o artesanal con menos de cinco empleados, que no están integradas a plantaciones forestales, por lo que destinan la mitad de la inversión a pagar la madera con la que trabajan.^[2,4] Esta desarticulación de

la cadena forestal trae como consecuencia una baja capacidad empresarial, bajo nivel tecnológico, desconocimiento de necesidades de producción y, por ende, alto índice de informalidad y competencia.

Sin embargo, la mayoría de empresas de este sector tienen como factor común diversas problemáticas:^[3,4] en el ámbito productivo, la escasez de madera de buena calidad, altos volúmenes de residuos, mano de obra no calificada, imposibilidad de mantener una calidad confiable en el producto final, existencia de intermediarios (comisionistas, transportadores y distribuidores) entre el proceso de tala de bosques y el transformador inicial; en el ámbito económico, poca estabilidad de demanda de productos y subutilización de la capacidad instalada; en el ámbito tecnológico, obsolescencia y predominio de producción artesanal; y en el ámbito ambiental, grandes emisiones de material particulado y generación de residuos. Por lo anterior, la política de las empresas productoras y transformadoras de madera debe estar encaminada a la tecnificación de las líneas industriales primarias, a la planificación, programación y control de producción y operación, a la asignación de esquemas de corte de trozas, a la distribución de planta por procesos y al aprovechamiento de residuos en otras aplicaciones industriales, con lo cual se podría garantizar un aumento en la eficiencia, eficacia y efectividad.^[4,5] En otras palabras, es necesario un mejoramiento continuo en los procesos industriales en la industria de maderas, en busca de productos de buena calidad, a bajos costos de producción y con altos rendimientos volumétricos.

Es de gran importancia considerar que actualmente el desafío primordial de la cadena forestal es minimizar los residuos de madera que se generan en los diferentes procesos de transformación, cuya generación está directamente relacionada con la eficiencia de conversión de madera rolliza a madera aserrada y a otros productos. Desde el momento del aprovechamiento de la madera se generan residuos como el follaje, entresacas, ramas y parte de la corteza, los cuales quedan localizados en las zonas de extracción; sin embargo, la mayor proporción de los residuos se genera en la etapa siguiente al aprovechamiento, conocida como procesamiento o transformación de la madera para la generación de productos. En la **Figura 1-1** se pueden apreciar los residuos generados en los diferentes eslabones de la cadena de valor forestal-madera.

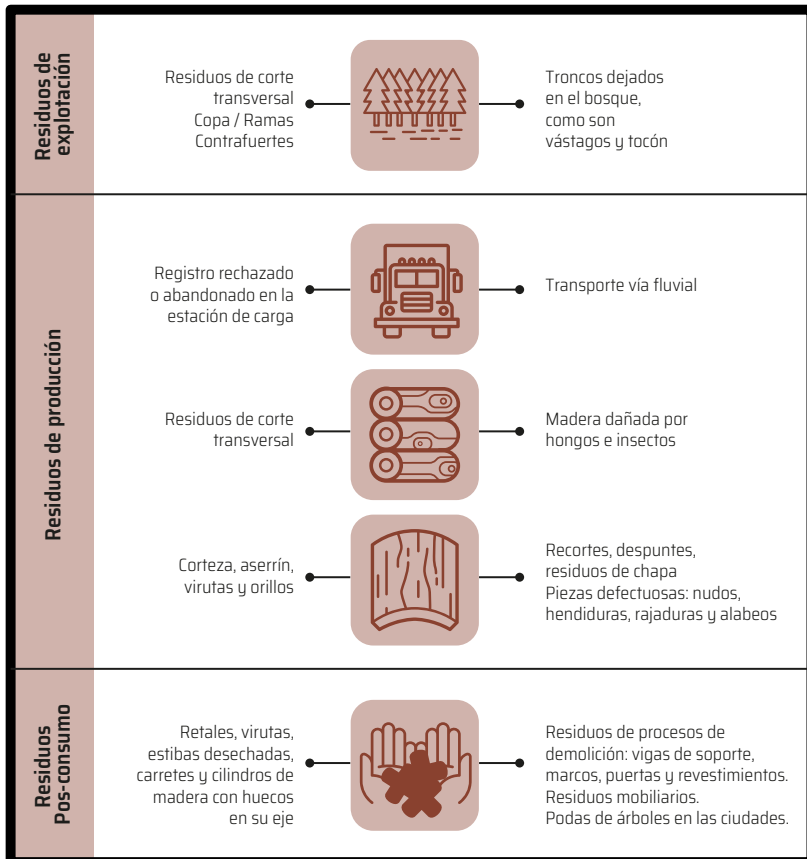


Figura 1-1. Residuos generados por la cadena de valor forestal-madera.

Tomada y modificada de^[6]

El eslabón de transformación primaria utiliza madera en rollo industrial como insumo para producir madera aserrada, destinada a la industria del mobiliario, empaques de madera, tableros y construcción en forma de madera estructural. Un estudio realizado por Econometría S. A. estimó que en Colombia, para el 2012, se extrajeron aproximadamente 11 millones de m³ de madera en rollo de los bosques naturales; el 70% fue destinado a la producción de madera como combustible y el 30% restante a madera industrial

en forma de trozas; de esta última, se utilizó el 60% como madera aserrada (cerca de 1,8 millones de m³), el 29% en pulpa y papel, el 1% en contrachapados, el 7% en paneles y tableros y el 3% en otros usos.^[1, 7]

Así como se ha evidenciado un aumento en la producción de trozas con fines industriales (de dos a tres millones de m³ entre el 2003 y el 2012),^[8] se ha evidenciado también un aumento considerable de residuos maderables: el hecho de que el 70% de la madera producida sea utilizada como combustible puede mostrar la gran cantidad de desperdicio en la obtención de la madera del bosque, aun cuando estos sean usados en la producción de pulpa y de *compost* para las mismas plantaciones o en el agro.^[1]

Se considera que los procesos de aserrado pueden analizarse a partir del proceso inicial de extracción y preaserrado que se realiza en la propia plantación o en el bosque natural mediante motosierra o aserríos hechizos de bajo nivel tecnológico, lo que produce trozas de dimensiones no aserrables o trozas defectuosas consideradas como residuos; estos pueden equivaler a entre 40% y 50% v/v por cada árbol en pie utilizado en la producción maderera.^[9, 10] Otra parte de los residuos, aproximadamente un 25% a 40%, se produce durante las operaciones de transformación: dimensionado y mecanizado de la madera.^[9] La mayor parte de estos residuos son recuperables como materia prima en otros puntos del sector, prolongando así su vida útil. Entonces, se estima que solo entre un 20% y 30% de la especie maderable es aprovechable.

El presente estudio centra su atención en los residuos obtenidos de los aserraderos y empresas de transformación secundaria para la producción de madera dimensionada requerida en la industria de la construcción, en el embalaje y la fabricación de mobiliario y otros productos.

Como la tarea fundamental de un aserradero es producir madera dimensionada para diferentes usos y clientes, por lo general se combinan diferentes tipos de máquinas y procesos, que varían de acuerdo con las condiciones de la materia prima, con la situación actual de la industria, con la disponibilidad de mano de obra calificada, con las dimensiones y acabado requerido de la troza y con el valor agregado que se le deba dar a la madera. En este sentido, se ha encontrado que las operaciones no son estandarizadas: se asierra todo tipo de madera con la misma maquinaria y herramientas, y se producen trozas con las dimensiones “populares” en la región o con

aquellas que el cliente demanda, lo que lleva a un aumento en los residuos tanto en el aserradero mismo como en los procesos secundarios para obtención de productos finales.^[1] La falta de estandarización en las medidas de la transformación primaria hace que los desperdicios aumenten sustancialmente.^[1] Cabe señalar, además, que existen otros factores relevantes en la producción de residuos, como lo son:^[6,11,12] las características y calidad de la troza (diámetro, curvatura, conicidad e imperfecciones físicas), tipo y tamaño del equipo de aserrío, mantenimiento de equipos e, inclusive, la destreza y capacitación de los operarios responsables. Ahora bien, si se pretende minimizar la generación de residuos madereros, la elección de maderas de calidad, el uso de nuevas tecnologías y la presencia de un personal capacitado pueden ser los factores predominantes para mejorar la capacidad de las operaciones de procesamiento de la madera, todo con el fin de lograr un uso racional y una eficiente conversión de la materia prima, así como un rendimiento más elevado.

Con la aparición de nuevas normativas medioambientales que obligan a gestionar cada residuo de forma adecuada, los residuos comienzan a ser un problema que dificulta el desarrollo de las actividades de la empresa. En este mismo sentido, una correcta y responsable gestión de los residuos debe incluir identificación, cuantificación, recolección y embalaje de los mismos, todo ello como preparación para su transporte y disposición final, siempre cumpliendo con las exigencias sanitarias y de seguridad industrial.^[13]

Los residuos generados en los aserraderos incluyen corteza, orillos (o lampazos), aserrín, virutas, recortes (o despuntes).^[14,16] La corteza es la capa externa de la madera rolliza y se obtiene en los aserraderos que poseen descortezadores. Los orillos corresponden a secciones laterales de la troza, caracterizados por tener una cara limpia (libre de corteza). El aserrín es un conjunto de partículas finas obtenidas del proceso de aserrado y dimensionado de la madera. Las virutas son tiras delgadas y enrolladas en forma de espiral, extraídas mediante un cepillo u otras herramientas, como brocas, al realizar trabajos de cepillado, desbastado o perforación. Finalmente, los despuntes son residuos de tamaño variable de secciones terminales de piezas obtenidos en el proceso de dimensionado. En la **Figura 1-2** se pueden observar los diferentes tipos de residuos generados en un aserradero.

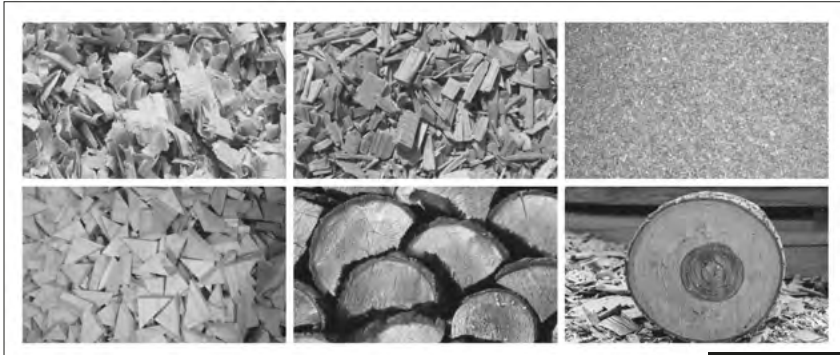


Figura 1-2. Tipos de residuos generados en los procesos de transformación primaria de la madera: virutas, chips, aserrín, despuntes, orillos y corteza.

¹Tomada y modificada de^[4]

La evaluación cualitativa y cuantitativa de los residuos anteriormente mencionados es primordial a la hora de proponer alternativas de uso y reutilización de “desperdicios” para elaboración de productos con valor agregado y desarrollo de tecnologías que no requieran mayor inversión. No cabe duda de que los usos alternativos dependen de la cantidad de residuos disponibles y de su calidad; por lo tanto, la cuantificación del volumen de desechos producto del aserrío y transformación secundaria se convierte en el primer paso para evaluar su uso potencial. Para tal fin, se sigue la siguiente metodología:

- Identificación y selección de aserraderos y empresas de transformación secundaria que serían objeto del análisis y recopilación de información. Se debe incluir una breve descripción del proceso productivo, consumo mensual de trozas, producción mensual de madera aserrada y transformada y tecnologías con las que cuentan.
- Identificación y selección de maquinaria más utilizada en la transformación de madera rolliza a madera aserrada y de madera aserrada a madera transformada.
- Evaluación de los rendimientos por equipos, la cual permite determinar la producción de madera aserrada y transformada (en metros cúbicos) por hora para cada máquina.

- Cuantificación de volumen y disponibilidad de residuos generados en las diferentes máquinas teniendo en cuenta el volumen inicial de la troza, el volumen de madera aserrada y el volumen de productos de madera.

Como el objetivo principal de este capítulo es la cuantificación de los desechos madereros, la recopilación de información se lleva a cabo mediante entrevistas y visitas desarrolladas en diferentes empresas del sector, sin la pretensión de constituir un censo o una muestra estadística; la idea es que dicha recopilación permita, junto con la investigación bibliográfica en fuentes secundarias, hacer un estimativo del porcentaje aproximado de residuos producidos, teniendo en cuenta abastecimiento y disponibilidad de materia prima, flujo de proceso, tecnologías utilizadas, capacidad instalada, producción mensual de madera aserrada y de productos con valor agregado (líneas de elaboración y remanufactura), tipo de residuos generados y manejo de los mismos.

Se tomó como base un estudio del rendimiento en el sector transformador de la madera en el Área Metropolitana realizado por la entidad homónima y por la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín; dicho estudio evalúa los rendimientos de las etapas de aserrado y transformación secundaria: canteado, cepillado y dimensionado, en términos de métodos, tiempos y desperdicios.^[17]

También, se tuvo en cuenta el aporte de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), que desarrolló un conjunto de metodologías fácilmente aplicables (incluidas en la llamada “evaluación rápida *BEFs*”),^[19] las cuales permiten obtener las indicaciones iniciales del potencial de bioenergía sostenible y facilitan el cálculo del potencial del aprovechamiento de residuos con base en la producción anual de madera en rollo, la tasa de extracción, la eficiencia de los aserraderos y el porcentaje de residuos que ya son utilizados. Finalmente, se incorporó información reportada por Chile y México, países que evaluaron la disponibilidad de residuos, origen, tipo, volumen y destino final.^[14,18]

El estudio del Área Metropolitana trabajó con una muestra de 30 aserríos en dicha zona, los cuales fueron categorizados por tamaño, maquinaria y cantidad de madera procesada mensualmente.^[17] Según el tamaño, los

aserríos fueron tipificados como empresas de primer, segundo y tercer nivel, y difieren principalmente por el proceso de transformación que llevan a cabo, distribución de planta e infraestructura, almacenamiento de materia prima y desechos, seguridad industrial, mano de obra y productos que elaboran; los anteriores aspectos mejoran al aumentar el nivel de la empresa.

El tipo y cantidad de maquinaria están implícitos en el tamaño de la empresa. Así, una empresa de primer nivel cuenta con pocas máquinas: solo las necesarias para hacer procesos de transformación básica como aserrado, cepillado y despuntes. Por su parte, en una empresa de segundo nivel, es común encontrar equipos un poco actualizados como cepillos doble cara, calibradoras y sierras múltiples, aunque siguen usando máquinas más comunes como aserradoras verticales u horizontales, cepillo, canteadora, sierra sinfin, circular, despuntadora, trompo y taladro. Y, finalmente, las empresas de tercer nivel utilizan algunas máquinas de última generación, que permiten automatizar y optimizar el proceso.

En resumen, se pudo evidenciar que la mayoría de empresas del sector maderero evaluadas en este estudio pertenecían al primer y segundo nivel, debido a que su producción era baja y aún no contaban con nuevas tecnologías para el procesado de la madera. Se tomó una muestra representativa, aproximada a la realidad del sector.

De igual manera, se identificaron y seleccionaron las máquinas que iban a ser evaluadas con base en la cantidad de residuos generados por su utilización y con base en su importancia en el proceso transformador básico; entonces, se seleccionaron cinco máquinas: aserradora vertical (u horizontal, según el aserrío), canteadora, cepillo sencillo, sierra circular y molduradora (cepillo cuatro caras). La anterior selección permitió llevar a cabo un análisis de rendimiento de acuerdo con la metodología de métodos y tiempos, consistente en calcular el tiempo que necesita un operario calificado para realizar una tarea determinada siguiendo los métodos convencionales propios de los procesos de transformación de la madera. Cada troza de madera rolliza fue medida antes de ser maquinada o aserrada, y el proceso comienza en el momento en que se levanta de la zona de almacenaje y termina cuando sale de cada etapa y es almacenada nuevamente. Como las piezas y los bloques de madera producidos generalmente son de diferentes

tamaños, se promediaron los tiempos por máquina sin tener en cuenta el tamaño de la pieza. No obstante, para garantizar precisión y exactitud, se tomaron varias medidas de los tiempos para cada proceso y por cada operario. El rendimiento de cada máquina es equivalente a la proporción entre el volumen de madera aserrada y el volumen de madera en rollo procesado.

En general, se evidencia que durante la transformación primaria y secundaria, se generan diversos residuos, que muchas veces son considerados subproductos por su capacidad de reaprovechamiento; los tipos de residuos son descritos en la **Tabla 1-1**.

Tabla 1-1. Tipos de residuos según la etapa del proceso de aserrado.

Etapas del proceso de aserrado	Tipo de residuo generado
Descortezado.	Corteza.
Aserrado de madera rolliza.	Orillos + aserrín.
Canteado.	Aserrín.
Cepillado.	Virutas.
Despuntado (dimensionamiento y moldura).	Aserrín + despuntes.

Muchos autores coinciden en afirmar que en los aserraderos se genera entre el 45% y el 65% de desperdicios por tonelada de madera procesada;^[20,23] en otras palabras, el rendimiento del proceso de transformación de madera rolliza a madera aserrada es del 35% y el 55%, lo que puede deberse al mal mantenimiento de las máquinas, a la mala capacitación de los operarios y a la falta de optimización en el corte de las trozas.^[23] Este último se considera el más relevante, ya que establecer esquemas de corte garantiza calidad en las piezas y altos niveles de aprovechamiento de la materia prima.

En vista de que el rendimiento de las diferentes máquinas de aserrado permite cuantificar el volumen de los residuos generados en un aserrío, en la **Figura 1-3** se muestra el porcentaje de estos en cada etapa de aserrado, calculado a partir del volumen inicial de la troza (m³) y del volumen de la troza aserrada (m³); allí se observa un rendimiento aproximado del 55% de la madera aserrada. Este resultado se relaciona con el reporte de la

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), difundido en el módulo *Recursos naturales de la evaluación rápida BEFs (BEFs RA)*; basados en una revisión bibliográfica, obtuvieron promedios globales de la eficiencia de las tecnologías utilizadas en el procesamiento de la madera en términos de tipo de producto y residuos.^[24]

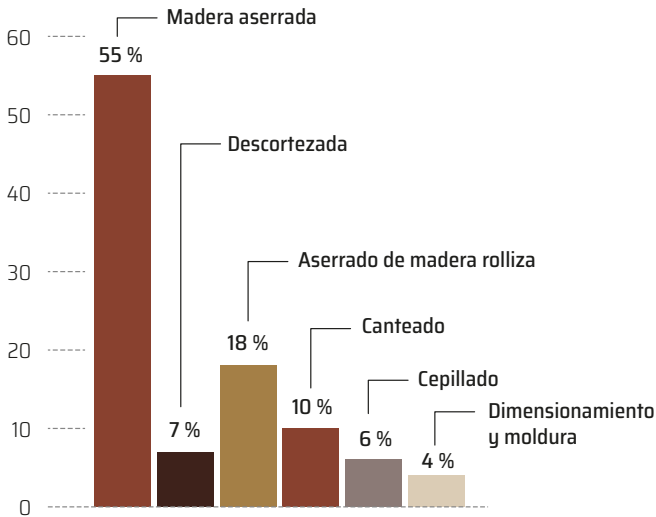


Figura 1-3. Porcentaje aproximado de madera aserrada y de residuos producidos en los procesos más comunes de un aserrío.

En la **Tabla 1-1** se puede notar la variabilidad existente de residuos por etapa de proceso. Si el aserradero cuenta con descortezadora, el primer residuo generado es la corteza, equivalente a un 7% en volumen de la troza y a un 15,56% del total de residuos. Se evidencia, además, que uno de los residuos que más se generan es el aserrín, como resultado del proceso de aserrado, canteado y dimensionado (despunte). En el proceso de aserrado, además de aserrín, se generan los orillos, que en ocasiones son aprovechados desde el inicio de la producción; el porcentaje de orillos arrojado en la investigación del Área Metropolitana es aproximadamente del 16, lo que representa entre el 35% y el 56% del total de residuos generados, mientras que el de aserrín está cercano al 2%, que sumado al desperdicio generado

en el canteado (10%) y dimensionado (1%), puede completar un 13%, lo cual representa cerca de 28,89% del total de residuos. Por su parte, las virutas, producto del cepillado de la madera, corresponden a un 13,33% del total, mientras que los despuntes obtenidos del dimensionado con una cabeceadora o despuntadora corresponden a un 6,67%. Se debe considerar que una proporción importante del volumen original de orillos y despuntes es reutilizado para generar astillas-chips sin corteza, generalmente comercializados para plantas de celulosa y tableros; así se alcanza una reutilización cercana al 40% de los residuos generados. Es importante destacar que algunos aserraderos cuentan con máquinas astilladoras, caso en el cual el volumen de producción de astillas (considerado como subproducto solamente en el caso que no contenga corteza) se asume equivalente al volumen de orillos.

Según lo expuesto, la generación de residuos está directamente relacionada con el volumen de producción; por lo tanto, el estimativo de residuos puede disminuir o aumentar dependiendo del tamaño de la empresa y de la eficiencia del aserradero (tasa de recuperación), con un desperdicio de entre el 45% y el 65% en promedio. Tomando como referencia la capacidad de producción de algunas empresas importantes del sector dedicadas al aprovechamiento forestal con fines industriales, se tiene que la capacidad de los aserraderos colombianos es de 20.000 m³ de madera aserrada/año, lo que generaría aproximadamente 12.000 m³/año de residuos en cada empresa (principalmente grandes y medianas). En el 2013, según la Superintendencia de Sociedades, bajo el segmento de transformación de la madera y fabricación de productos de madera había 1.867 empresas registradas;^[25] considerando que el 30% de estas empresas son catalogadas como medianas o grandes, en total se producirían aproximadamente 6,7 millones de m³/año de residuos, de los cuales se estima que alrededor de 4,4 millones de m³/año sean principalmente recuperados por las industrias de tablero o papel.

Si la cuantificación de residuos se basa en la producción anual de madera aserrada, la eficiencia de los aserraderos y el uso actual (considerando que no se utilizan), se tendría un total de residuos de 1,4 millones m³/año, para una producción de madera aserrada de 1,9 millones de m³/año.

Para evaluar la disponibilidad de los residuos madereros es importante conocer el destino que tienen luego de ser generados en el proceso de transformación; esto permite determinar el volumen de los residuos (considerados como aprovechables, ya sea para la generación de un subproducto o para su comercialización) y el volumen inaprovechable. En su mayoría, los aserraderos pequeños tienen bajas necesidades de energía; por esta razón, regalan o venden los residuos que producen a precios que son aproximadamente iguales al costo de transporte, así que no reciben mayor beneficio por estos subproductos.

Teniendo en cuenta la gran magnitud de desechos generados a partir de la transformación de la madera y contemplando apreciaciones como las de Marín Villar,^[13] la preocupación más notable en los aserraderos y empresas dedicadas a la elaboración de productos del mobiliario es qué hacer con los residuos de madera, pues se consideran un problema productivo, ambiental y económico debido a su lenta degradación natural, costo de transporte y disposición, reducción del espacio disponible en los centros de elaboración de madera y riesgos ambientales por incendios y autocombustión o propagación de plagas y enfermedades.^[26] Por ello, es indispensable evaluar la capacidad de aprovechamiento de estos residuos en diversas aplicaciones industriales, buscando dar un valor agregado a aquel material que en la actualidad es considerado desecho, ya sea para el autoaprovechamiento en el proceso productivo de la madera o en la elaboración de otros productos como pulpa, papel, tableros, adsorbentes, *compost*, madera plástica, biocombustibles, etc.

Referencias bibliográficas

1. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, “Cadena productiva forestal-Tableros aglomerados y contrachapados-Muebles y productos de madera”. P. 176, 2007.
2. Departamento Nacional de Planeación de Colombia (DNP), “Agenda interna para la productividad y la competitividad. Documento sectorial: cadena forestal, madera y muebles”, Bogotá D. C., Colombia, 2007.
3. X. Acevedo Gaitán y H. Martínez Covalada, “Características y estructura del sector forestal-madera-muebles en Colombia”, Bogotá D. C., Colombia, 2003.

4. Cámara de Comercio de Bogotá (CCB), Corporación Ambiental Empresarial (CAE), Acercar Industria y Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente (DAMA), “Guía ambiental para el sector de muebles de madera”, Bogotá D. C., Colombia, 2004.
5. J. F. Herrera-Medina y R. O. Leal-Pulido, “Generación de patrones de corte a partir de la programación matemática para la planificación táctica-operativa de aserríos madereros”, Colombia Forestal, vol. 15, pp. 227-245, 2012.
6. Guyana Forestry Commission and International Tropical Timber Organization, “Code of Practice for Wood Processing Facilities (sawmills & Lumberyards)”, 2012. [En línea]. Disponible: <https://www.forestry.gov.gy/code-of-practice-for-wood-processing-facilities-for-guyana-sawmills-and-lumberyards-itto/>.
7. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, “Cadena forestal-madera”, 2014. [En línea]. Disponible: <https://sioc.minagricultura.gov.co/Forestal/Documentos/005 - Documentos Técnicos/Documento Cadena Forestal 2014.pdf>.
8. Banco Mundial, Departamento Nacional de Planeación de Colombia (DNP), Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural y Potencial de Reforestación Comercial en Colombia-Diagnóstico (Profor). P. 53, 2015.
9. O. López, “Aprovechamiento y uso de madera obtenida de entresacas de plantaciones forestales”, Revista El Mueble y la Madera, vol. Edición 76, pp. 28-33, 2012.
10. J. M. Rincón Martínez y E. Electo Lora, “Bioenergía: fuentes, conversión y sustentabilidad”, primera edición, Bogotá D. C., Colombia, 2014.
11. P. H. Steele, “Factors determining lumber recovery in sawmilling”, Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. P. 8, 1984.
12. C. G. Lundahl, “Optimized processes in sawmills”. Luleå University of Technology, Division of Wood Science and Technology, Skellefteå, Suecia, 2007.
13. C. Marín Villar, “¿Qué hacer con los residuos de la madera: aprovechar o pagar?”, Revista El Mueble y la Madera, vol. Edición 90, pp. 68-77, 2015.
14. Comisión Nacional de Energía (CNE), Instituto Forestal (Infor) y Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ), “Disponibilidad de residuos madereros: residuos de la industria primaria de la madera y disponibilidad para uso energético”, Santiago de Chile, Chile, 2007.
15. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), “Energy conservation in the mechanical forest industries”, p 93. Roma: Forestry Department, 1991.
16. S. Ashton y P. Cassidy, “Utilization of woody biomass: wood processing residues”, Sustainable Forestry for Bioenergy and Bio-based Products, pp. 165-168, 2007.

17. J. C. Sierra, “Estudio de rendimiento en el sector transformador de la madera en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá”, Área Metropolitana del Valle de Aburrá- Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia, 2010.
18. L. M. Reyes Cortés, “Cuantificación y aprovechamiento de residuos del proceso de aserrío del Parque Industrial Ixtlán de Juárez, Oaxaca”, Universidad de La Sierra Juárez, 2013.
19. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), The Bioenergy and Food Security (BEFS), Approach, 2016. [En línea]. Disponible: <http://www.fao.org/energy/befs/en/>.
20. T. A. Erhabor, “Evaluation of wood wastes from sawmilling operations in Benin City, Edo State”, J. For. Res. Manag., vol. 12, pp. 113-124, 2015.
21. Remade Scotland, “Wood waste arising in Scotland: assessment of available aata on scottish”, Escocia, 2004.
22. B. Olufemi, J. O. Akindeni y S. O. Olaniran, “Lumber recovery efficiency among relected sawmills in Akure, Nigeria”,Drv. Ind., vol. 63, n.º 1, pp. 15-18, 2012.
23. A. Barua, A. Tarek, A. Chowdhury, S. H. Mehidi y H. M. Muhiuddin, “Residue reduction and reuse in wooden furniture manufacturing industry”, Int. J. Sci. Eng. Res., vol. 5, n.º 10, 2014.
24. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), “Evaluación Rápida BEFS. Aprovechamiento forestal y residuos del aprovechamiento de la madera”, 2014. [En línea]. Disponible: <http://www.fao.org/3/a-bp857s.pdf>.
25. C. Marín Villar, “Datos económicos del mueble y la madera”, 2013. [En línea]. Disponible: <https://revista-mm.com/blog/economicos/20-datos-economicos-del-mueble-y-la-madera/>.
26. M. B. Sarmiento Oviedo, “Alternativas de compostaje de aserrín de pino caribe (*Pinus caribaea*) en la industria maderera Refocosta S. A., municipio de Villanueva, Casanare, Colombia”, Rev. Investig. Agrar. y Ambient., vol. 2, n.º 2, pp. 21-32, 2011.

Selección de maderas de estudio

Colombia, gracias a sus predominantes ecosistemas forestales, cuenta con una vasta diversidad de especies maderables que difieren principalmente por sus propiedades físicas, químicas y mecánicas (esto le confiere determinadas características de trabajabilidad y durabilidad a la madera), por su disponibilidad y abundancia y por sus usos potenciales. En favor del análisis, serán seleccionadas tres especies maderables.

La selección de las especies dentro del presente estudio se basó en diferentes criterios que permitieron identificar aquellas que pueden extraerse, aprovecharse y comercializarse de manera racional, eficiente y sostenible, y que cuentan con un potencial de aprovechamiento. Se espera, además, que dichas especies no sean producto de deforestación masiva e ilegal de bosques naturales, y que no estén amenazadas o en riesgo de extinción.^[1] En este orden de ideas, se desarrolló un análisis multicriterio (método cualitativo/cuantitativo) para una toma de decisiones estratégica, idónea, rápida y efectiva sobre las especies, utilizando diferentes medios de consulta; uno de estos el informe desarrollado por el Área Metropolitana y la Universidad Nacional durante 2010, que evalúa integralmente el estado de la industria forestal en dicho territorio.^[2]

1. Criterios de selección de especies de estudio

Los criterios de selección de las especies maderables que serán caracterizadas física y químicamente para determinar su capacidad de aprovechamiento son los que siguen:

- Dedicación de empresas madereras a producción de mobiliario.
- Volumen de venta anual reportado por cada empresa.
- Información de procedencia y provisión de la madera empleada para la elaboración de productos: identificación de la cadena de custodio de la madera.
- Volumen mensual y presentación de compra de la madera (rastra, bloque, tablón).
- Especies más usadas por las empresas seleccionadas según criterios anteriores.
- Reporte de especies amenazadas.
- Capacidad de aprovechamiento de especies novedosas.

Una vez aplicados los criterios de selección expuestos, se concluye sobre las especies de mayor posibilidad para orientar los esfuerzos de fomento e investigación.

2. Descripción del proceso de selección

El proceso comienza con la elaboración de una lista de especies maderables con consumo mensual superior a 1.000 rastras (esta pieza de madera es muy común en los aserraderos y sus medidas son 300 cm de largo x 50 cm de ancho x 11 cm de grueso); al final quedaron 21 especies, las cuales se muestran en la **Tabla 2-1** con su respectiva cantidad total de consumo. Para compilar esta información fueron considerados los reportes proporcionados por 432 empresas del sector en 2010.^[2]

Tabla 2-1. Consumo de especies en el sector maderero.

Ítem	Especie	Presentación		
		Rastra	Tabla	Tablón
1	Roble.	10.414	240	4
2	Pino pátula.	8.618	-	1.000
3	Ciprés.	6.183	-	2.500

Continúa en la siguiente página.

Continuación de la **Tabla 2-1**.

Ítem	Especie	Presentación		
		Rastra	Tabla	Tablón
4	Cedro.	6.086	206	54
5	Pino.	5.566	20	-
6	Dormilón.	5.185	-	-
7	Higuerón.	5.000	-	-
8	Sapán.	4.714	-	-
9	Abarco.	3.645	75	1
10	Cativo.	3.320	1.200	300
11	Chingalé.	3.051	530	-
12	Pino <i>elioti</i> .	3.000	-	-
13	Pino ocarpa.	3.000	-	-
14	Chanul.	2.975	-	-
15	Nogal.	2.830	-	-
16	Algarrobo.	2.367	-	-
17	Lechero.	2.230	-	-
18	Eucalipto.	1.722	2.500	-
19	Perillo.	1.700	-	-
20	Sande.	1.380	-	-
21	Teca.	1.297	-	-
22	Carrá.	1.131	30	10

Posteriormente se hace el filtro de las empresas que tengan un porcentaje de dedicación en la elaboración de productos del mobiliario superior al 75. Dicho porcentaje se calcula con base en los productos que elaboran y que se encuentran dentro de los considerados en la **Tabla 2-2**. Así, por ejemplo, si una empresa se dedica solo a elaborar muebles, tiene un porcentaje de dedicación del 100%; mientras que si una empresa fabrica muebles, estibas, cocinas y puertas, tiene un porcentaje de dedicación del 75% (debido a que las estibas no son consideradas como producto del mobiliario).

Tabla 2-2. Productos considerados como mobiliario.

Ítem	Detalle	Ítem	Detalle
1	Archivadores.	23	Muebles de hogar.
2	Bancas.	24	Muebles de oficina.
3	Barras.	25	Muebles modulares.
4	Bibliotecas.	26	Muebles para niños.
5	Bibliotecas.	27	Muebles rústicos.
6	Butacos.	28	Muebles tallados.
7	Cajonería.	29	Nochero.
8	Cajones.	30	Pasamanos.
9	Cocinas.	31	Percheros.
10	Cuadros.	32	Pisos.
11	Descansa pies.	33	Poltronas.
12	Entrepaños.	34	Portarretratos.
13	Escalas.	35	Portones.
14	Escritorio.	36	Puertas.
15	Gabinetes.	37	Puertas y marcos.
16	Madera aserrada.	38	Salas.
17	Marcos.	39	Sillas.
18	Marcos de puerta.	40	Sofás.
19	Mesas.	41	Taburetes.
20	Módulos de pared.	42	Ventanas.
21	Muebles.	43	Vitrinas.
22	Muebles de baño.	44	Zócalos.

Sigue la aplicación del filtro relacionado con los valores de ventas anuales para seleccionar aquellas empresas cuyas ventas anuales son mayores a 100 millones de pesos (COP). Con la aplicación de los dos filtros anteriores, la matriz de empresas se reduce a 38 registros, los cuales permanecerán en el próximo análisis.

En vista de que se tiene un elevado número de empresas, se realiza un tercer filtro para identificar aquellas que cuenten con información de las

especies de madera utilizadas, presentación de compra (bloques, tablas, trozas, tablones) y producción mensual; aquí queda un total de 28 registros. A continuación se hace una selección manual de las empresas que reportan la procedencia y los proveedores de las especies que utilizan, para llegar a nueve que cumplen con los criterios, tal y como se observa en la **Tabla 2-3**.

Tabla 2-3. Empresas del sector que cumplen con todos los filtros aplicados.

Empresas	Especie							
	Cedro	Roble	Pino pátula	Ánime	Muanamo	Carrá	Teca	Nogal
Empresa 1	X	X			X			
Empresa 2						X		
Empresa 3	X	X					X	
Empresa 4		X						
Empresa 5		X						
Empresa 6		X						
Empresa 7		X	X	X				
Empresa 8	X	X						
Empresa 9								X
Total consumo (rastras/mes)	71	642	42	42	60	100	30	20

Considerando el resultado de especies más utilizadas generado por el filtro anterior y relacionando este con el consumo de madera, se preseleccionan las siguientes: roble, carrá y cedro. Luego, se consulta en el *Libro rojo*^[1] y se encuentra clasificación de peligro para el cedro (*Cedrela odorata*) y de vulnerable para el carrá (*Huberodendron patinoi*) y el roble (*Quercus humboldtii*); esto significa que en un futuro probablemente no haya suficientes plantaciones para el aprovechamiento con fines industriales, por lo que se seleccionan como especies de estudio el Pino pátula y la Teca, teniendo en cuenta la disponibilidad actual de empresas de la industria mobiliaria en Antioquia.

El Pino pátula se encuentra ampliamente distribuido en Colombia y está siendo utilizado para la obtención de madera para aserrío, pulpa, tableros

y otros.^[3] En vista de que ha demostrado ser una especie capaz de crecer en suelos completamente degradados, erosionados y pobres en nutrientes e, incluso, en climas extremos,^[4, 5] es utilizada para reforestación y actualmente hay cerca de 61.907 hectáreas sembradas en todo el país.^[3] Por su parte, la Teca es catalogada como una de las maderas más finas y de mayor consumo en el mundo. Es conocida como la reina de las maderas por sus características de dureza y resistencia, y valorada por sus aceites esenciales.^[6] Las plantaciones de Teca en Colombia se estiman en un promedio de entre 18.000 y 25.000 hectáreas.^[7] La gran demanda y el interés medioambiental y económico han hecho de esta especie uno de los recursos más interesantes para un proyecto de reforestación productiva, lo que sugiere un mercado emergente de gran fuerza global por su alta calidad y rentabilidad (gracias a su alto precio, con una amplia diferencia sobre las demás especies).^[5]

Finalmente, usando el criterio de selección de especies novedosas, se encuentran en la literatura los reportes relacionados con la especie *Acacia mangium*, destacada por su capacidad de adaptación a condiciones extremas y adversas (como suelos ácidos y pobres en nutrientes) y por su facilidad de reproducción y reparación de la capa vegetal de tierras degradadas, por lo que favorece la recuperación de suelos alterados por procesos como la extracción de oro;^[8] también, por su calidad estructural y estética y por su rápido crecimiento (en promedio 10 años).

La capacidad de aprovechamiento de esta especie en el país es alta, con un aproximado de 29.000 hectáreas sembradas desde el año 2000, lo que genera posibilidades de expansión según su tiempo de cosecha. Entonces, esta selección puede contemplarse como una oportunidad para la especie y para la industria, dado que en la actualidad hay gran desconocimiento sobre su mercado, proceso silvicultural y productos aprovechados.^[5,9]

3. ¿Por qué analizar y caracterizar al *Pinus patula*, la *Tectona grandis* y la *Acacia mangium*?

La motivación fundamental para utilizar estas tres especies en el presente estudio es la viabilidad que poseen respecto a la sostenibilidad, disponibilidad y accesibilidad, lo que impacta directamente en la productividad de los diferentes sectores industriales, principalmente el mobiliario. Conviene recalcar que la sostenibilidad es un propósito cada día más importante si se toma en consideración que a través de las plantaciones forestales no solo se pretende cubrir los requerimientos nacionales de madera, sino también propiciar la disminución de la deforestación de bosques nativos, proteger el suelo y favorecer el clima. Uno de los principales retos que enfrenta el país es fomentar el equilibrio entre el medio ambiente y el desarrollo sustentable, de manera que se garantice el crecimiento productivo, económico y social, y la protección ambiental con el uso responsable, racional y eficiente de los recursos naturales y los residuos industriales. Para lograrlo, se ha incentivado la reforestación con el fin de mejorar la cadena productiva forestal (madera, mueble, tablero y otros productos), la investigación y desarrollo (I + D) en las áreas asociadas a la cadena, la reconversión tecnológica y la fabricación de productos de madera con alto valor agregado para exportación.

En conclusión, aunque todas las especies presentan retos y beneficios para el sector forestal, estas tres permiten una visión global del futuro maderero del país a partir de la identificación de las fortalezas y debilidades de la industria, lo que motiva la ejecución de proyectos de investigación como el aquí desarrollado.

Referencias bibliográficas

1. D. L. Cárdenas y N. R. Salinas, “Libro rojo de plantas de Colombia”, vol. n.º 4, Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas (SINCHI), Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Bogotá D. C., Colombia, 2007.
2. J. C. Sierra, “Evaluación integral del estado de la industria forestal en la jurisdicción del Área Metropolitana”, Área Metropolitana del Valle de Aburrá-Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia, 2010.
3. C. Ospina, R. Hernández, E. Restrepo, *et al.* “Guías silviculturales para el manejo de especies forestales con miras a la producción de madera en la zona Andina colombiana: Pino pátula”. Serie Cartillas Divulgativas, Manizales, 2011.
4. J. Berrío, A. Dávila, V. Giraldo, *et al.* “La reforestación en Colombia: visión del futuro”. Fedemaderas y Fundación Konrad Adenauer, 2010.
5. E. Trujillo “¿Con cuál especie reforestar en Colombia?”, Rev. El Mueble y la Madera, vol. Edición 89, pp. 14-19, 2015.
6. Forwood Forestry Panama S. A., “Propuesta de inversión en Teca: una opción de inversión provechosa”, Reporte, Panamá, p. 20, 2008.
7. J. L. Ordóñez Jiménez, “Plantaciones de Teca: negocio en alza”, Rev. El Mueble y la Madera, vol. Edición 80, pp. 20-25, 2013.
8. E. A. Mateus, “*Acacia mangium*, una especie para sembrar en serio”, Rev. El Mueble y la Madera, vol. Edición 80, pp. 1-5, 2013.
9. Reforestadora Cacerí, “*Acacia mangium*. Lo que usted debe saber sobre *Acacia mangium*”. Reporte, Medellín, p. 6, 2010.

Generalidades de especies maderables

En orden a entender el comportamiento de la madera durante las aplicaciones resulta conveniente tener un básico conocimiento de la estructura y composición química de la materia prima. Las variaciones estructurales influyen en las propiedades químicas y mecánicas de la madera y, por ende, en el producto final.

En este capítulo se detalla, primeramente, la estructura física y microscópica de un árbol; seguidamente se describen las especies seleccionadas: características físico-químicas, origen, condiciones de cultivo y usos.

1. Estructura de un árbol

Todos los árboles tienen tres sistemas principales: una red de raíces responsable de la extracción de agua y minerales del suelo, apoyo mecánico y almacenamiento de sustancias bioquímicas; una corona de hojas, donde el agua y los minerales se combinan con dióxido de carbono en presencia de la luz solar con el fin de producir alimento para el árbol (fotosíntesis); y un tronco que soporta el árbol y transporta nutrientes desde y hacia las raíces.^[1,2] Normalmente, solo el tallo es utilizado para propósitos industriales, por lo que será estudiado en la siguiente sección.

Una sección transversal de un tronco de árbol revela diferentes partes, como se muestra en la **Figura 3-1**, marcadas por una serie de bandas concéntricas llamadas anillos de crecimiento, que representan el crecimiento en un año.^[1,2] La capa exterior de cualquier tallo es, por supuesto, la corteza, que se puede subdividir en corteza externa muerta (cuyo grosor varía con la especie y edad del árbol), encargada de protegerlo contra daños físicos,

mecánicos y biológicos, y de limitar la pérdida de agua, y corteza viva interior (o floema), a través de la cual los azúcares producidos por fotosíntesis (fotosintético o “alimento”) son llevados de las hojas a las raíces o a otras partes en crecimiento del árbol.^[1,3]

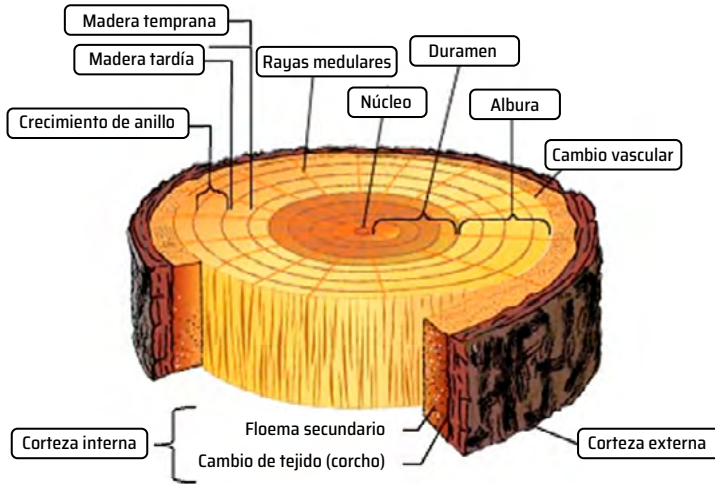


Figura 3-1. Sección transversal de un tronco de madera.
Tomada y modificada^[67]

Adyacente a la corteza interior se encuentra la capa de *cambium*, una fina capa de células donde tiene lugar el crecimiento, es decir, la división celular, y solo puede verse con un microscopio.^[3,4] En las partes internas del tallo se identifican claramente la albura, el duramen y la médula: la albura contiene el tejido vivo y muerto, conduce agua, savia y minerales desde las raíces hacia las hojas, almacena y sintetiza nutrientes y ayuda a sostener el árbol.^[2,3] El duramen está hecho de células muertas y fisiológicamente inactivas que no funcionan en conducción del agua ni almacenaje del alimento^[4] (se evidencia un color más oscuro en la transición de albura a duramen, característico de un aumento de contenido de extractivos).^[3] Finalmente, la médula está normalmente presente en el centro del tronco y representa los tejidos (madera juvenil del xilema) desarrollados durante los años iniciales del árbol.^[1,2]

Las diferencias entre la albura y el duramen son importantes para las diferentes aplicaciones debido a que al ser más porosa que el duramen, la albura absorbe mejor los acabados; y el duramen, al ser más denso, suele ser más duradero y resistente a la desintegración.

Botánicamente, los árboles se pueden agrupar en gimnospermas (coníferas, plantas que producen semillas no cubiertas como píceas, pinos, abetos) y angiospermas (grupo de plantas que producen flores y semillas cerradas, con hoja caduca y ancha).^[2,4,5] Con base en la anterior clasificación, la madera se divide en blandas (producidas por especies gimnospermas) y duras, obtenidas de especies angiospermas. Sin embargo, no todas las maderas blandas son suaves y ligeras, ni todas las duras son pesadas. Una vista microscópica permite concluir que los diferentes tipos de madera difieren anatómicamente: las blandas están constituidas por células traqueidas (ubicadas longitudinalmente dentro del tronco; sus funciones son conducir el agua y darle apoyo estructural al árbol) y por células parenquimatosas, colocadas radialmente dentro del tronco y encargadas del almacenamiento de sustancias (como resinas).^[4,5] Por su parte, las maderas duras tienen una organización anatómica más compleja, puesto que están constituidas por varios tipos de células, fibras que proporcionan soporte estructural y en ocasiones facilitan el transporte del agua, los vasos conductores que aparecen en secciones transversales de madera como agujeros y las células de parenquimatosas que se encargan del almacenamiento de materiales de reserva (como el almidón).^[1,4,5] No obstante, las maderas duras y las blandas presentan una importante similitud celular: la mayoría de las células están muertas en la madurez incluso en la albura.^[2]

Las diferencias en el comportamiento y en el papel que desempeñan las células en los tejidos del árbol vivo (es decir, soporte, transporte, almacenamiento) tienen que ver con la variabilidad en su estructura física, así como con la organización anatómica de la pared celular individual (es decir, la microestructura y la organización supramolecular) y la composición química. En general, las paredes celulares de la madera están compuestas de hemicelulosa, lignina y celulosa; esta última forma una matriz esquelética que está rodeada e incrustada en la hemicelulosa y la lignina,^[2] como se aprecia en la **Figura 3-2**, se considera que la hemicelulosa se une con la celulosa

mediante enlaces de hidrógeno, lo que puede influir en la capacidad de las microfibrillas para deslizarse una por la otra; las paredes celulares están impregnadas con lignina, lo que las hace impermeables al agua.^[5] La lignina proporciona a la pared celular rigidez y resistencia a la compresión. Una breve descripción de los constituyentes se presenta a continuación:

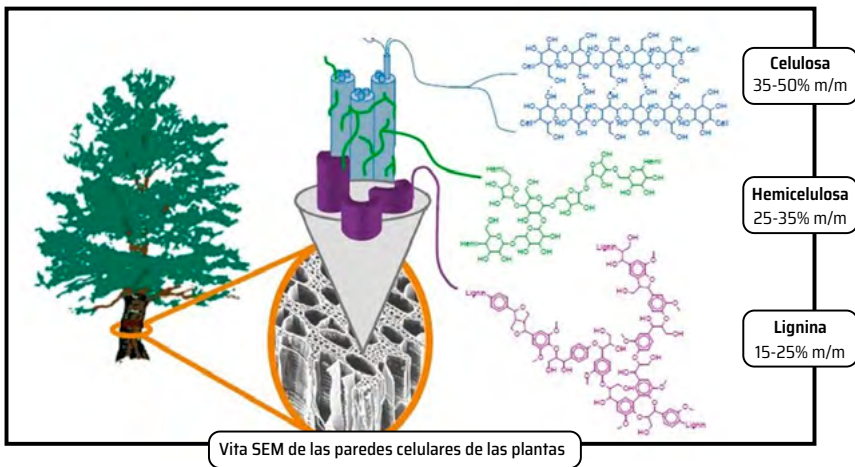


Figura 3-2. Estructura molecular de un tallo.

Tomada y modificada de ^[6]

La celulosa es el biopolímero más abundante en la tierra. Es sintetizado en plantas, árboles e, incluso, algunas variedades de algas, y se define como un polisacárido lineal, formado por una larga cadena de moléculas de glucosa unidas por enlaces glucosídicos (α 1-4). Durante el crecimiento del árbol y debido a su naturaleza lineal, es capaz de formar fuertes enlaces inter- e intramoleculares y agregados de moléculas, como fibrillas elementales, microfibrillas, protofibrillas, etc.,^[2,7] que, a su vez, se organizan en los elementos estructurales más grandes que conforman la pared celular de las fibras de madera;^[3] además, representan entre el 40% y el 45% del peso en seco de la madera.^[8]

La hemicelulosa es un grupo de biopolímeros ramificados y heterogéneos (también un polisacárido) formado en cadenas más cortas, de 500 a 3.000 unidades de azúcar, en oposición a las 7.000-15.000 moléculas de glucosa por polímero no ramificado observado en celulosa. Actúa como “rol estructural” en las paredes de fibra y en las fibras de madera se encuentran disponibles diferentes monómeros (como manosa, arabinosa, xilosa, galactosa y hasta glucosa), que constituyen las hemicelulosas y les confieren a las fibras resistencia y dureza de acuerdo con su porcentaje y extensión.^[2,7] Están entre el 25% y el 35% del peso de la madera.^[9]

La lignina es una resina polifenólica, amorfa, altamente ramificada y compleja, sin estructura exacta; son polímeros heterogéneos 3D, basados en tres monolignoles: a) alcohol p-cumárico, b) alcohol coniferílico y c) alcohol sinapil.^[2,7] La lignina llena los espacios en la pared celular entre los componentes de celulosa, hemicelulosa y pectina.^[9] Está vinculada covalentemente a la hemicelulosa y de este modo forma un complejo lignocelulósico que confiere resistencia mecánica a la pared celular y, por extensión, a la planta en su conjunto. La lignina representa entre el 15% y el 30% del peso en seco de la madera.^[8]

La madera también contiene una pequeña cantidad de sustancias extractivas, que incluyen, entre otros, lípidos, taninos, compuestos polifenólicos, terpenoides, ácidos grasos, ácidos de resina, ésteres de esteroides, esteroides, ceras e intermediarios metabólicos simples.^[2,3] Se denominan extractivas porque se pueden “extraer” de la madera con disolventes tales como agua, alcohol, acetona, benceno o éter. Generalmente, el contenido de extractivos varía entre el 2% y el 5%, pero puede llegar al 15% dependiendo de factores como las especies, las condiciones de crecimiento y la época del año en que se corta el árbol. Aunque las sustancias extractivas son un pequeño porcentaje de la composición total de la madera, tienen una influencia significativa sobre sus propiedades: resistencia mecánica, color, olor, sabor, resistencia a la descomposición, densidad, higroscopicidad e inflamabilidad, por lo cual la calidad de la madera puede ser afectada por la cantidad y tipo de estos extractos.^[3]

En conclusión, variaciones significativas en las características y volumen de los anteriores componentes y diferencias en la estructura celular hacen que la madera sea pesada o ligera, rígida o flexible, dura o suave. La utilización eficiente de la madera en aplicaciones ingenieriles exige la identificación de la especie de la cual se obtiene, dado que las maderas de diferentes especies del mismo género a menudo tienen propiedades físicas, mecánicas o químicas únicas y un comportamiento diferente en diversas condiciones, por lo que pueden surgir serios problemas si las especies o géneros se mezclan durante el proceso de fabricación y uso.

2. Generalidades del Pino pátula

En Colombia es conocido como pino, Pino pátula, pátula o pino llorón. En su área de distribución natural se denomina pino chino, pino llorón mexicano, pino colorado, Pino pátula, ocote macho, pino xalocote. En países de habla inglesa, *patula pine*, *mexican weeping pine*, *spreading leaved pine*.^[10]

Taxonomía

- **Domino:** Eucariota.
- **Reino:** *Plantae*.
- **Filo:** *Spermatophyta*.
- **Subfilo:** *Gymnospermae*.
- **Clase:** *Pinopsida*.
- **Orden:** *Pinales*.
- **Familia:** *Pinaceae*.
- **Género:** *Pinus*.
- **Nombre científico:** *Pinus patula*.

Esta especie es exótica en Colombia. En el país existen ocho especies nativas de pino, agrupadas en tres géneros: *Podocarpus* (*oleifolius*, *macrostachyus*, *magnifolius*, *guatemalensis* y *allenii*); *Prumnopitys* (*Prumnopitys montana* y *Prumnopitys harmsiana*) y *RetropHyllum* (*RetropHyllum rospigliosii*).^[11]

Descripción botánica

El Pino pátula es un árbol de porte mediano a grande: de hasta 40 m de altura; fuste recto, cilíndrico en un comienzo y bastante cónico en casi toda su longitud, y diámetro de 1,20 m.^[10,12] Es de crecimiento rápido: en condiciones favorables puede alcanzar una altura de 15 m después de ocho años y de 35 m después de 30 años.^[13] La característica peculiar de esta especie es el evidente contraste entre el color rojizo de la madera joven y el marrón de la madera tardía;^[14] en árboles maduros, la corteza es gruesa, con profundas fisuras verticales en la parte inferior del tronco. Sin embargo, a altura de 3 a 4 m la corteza se hace delgada, áspera y escamosa.^[14]

Por lo general, la distribución de las ramas es desuniforme y verticilada; además, las ramas pequeñas son escamosas y rojizas. La copa es extendida, con ramas largas y colgantes, y una corteza delgada con un ligero tinte blanquecino en las partes más tiernas.^[12,15] Las hojas son como péndulas, agrupadas en fascículos de tres a cuatro que permanecen en el árbol de dos a cuatro años, con de 11 a 27 cm de largo y 0,5 mm de ancho; son flexibles, de color verde azulado y bordes ligeramente aserrados.^[14] Las vainas de las acículas son de color ceniza, persistentes y de 1,5 cm de largo. Las yemas terminales son largas, erguidas y amarillentas.^[10]

Las flores son unisexuales; las inflorescencias femeninas son de color púrpura, distribuidas en racimos de hasta ocho escamas, mientras que las inflorescencias masculinas son de color verde en la juventud y amarillas al madurar, y se ubican en el terminal de las ramas. Los frutos son conos brillantes, asimétricos y torcidos, de color gris claro a marrón, de 4 a 12 cm de largo y diámetro de 2,5 a 4 cm; se agrupan en haces de tres a seis. Un cono contiene de 40 a 80 semillas viables, aladas, triangulares, de color marrón negruzco y de 3 a 5 mm de longitud.^[10,16]

Origen y distribución geográfica

Esta especie nativa de los trópicos y zonas templadas ha sido ampliamente utilizada desde la década de los 40.^[14] Se afirma que fue introducida en Colombia desde Sudáfrica y México, e incluso desde regiones de

Centroamérica, con resultados favorables en su crecimiento. Es así como se halla ampliamente distribuida en el Valle del Cauca, Cauca, Antioquia, Cundinamarca y los Santanderes, con ligeras variaciones morfológicas, pero comportamiento y fisonomía similares.^[10]

Condiciones de cultivo y adaptación

En su área de distribución, el Pino pátula se encuentra por lo general en regiones de cálidas a frescas, bajo condiciones de clima templado húmedo o subhúmedo, a una altitud entre 1.500 y 3.100 msnm, un rango de precipitación que va desde 1.000 hasta 2.000 mm/año y una temperatura anual promedio que oscila entre 9 y 23 °C;^[12,13] en cuanto a la temperatura media, promedios anuales mayores que 26 °C no permiten que la especie se desarrolle adecuadamente (sus crecimientos son bajos).^[10,12]

Como es una especie exótica, este pino crece con éxito en una gran variedad de suelos, especialmente en los ácidos (o neutros), profundos, húmedos, bien drenados y con textura franca, arenosa o arcillosa; de hecho, se ha cultivado con éxito en suelos volcánicos jóvenes, a la vez que en suelos viejos, lixiviados y estériles.^[17,18] Sin embargo, no prospera en áreas donde ocurren heladas o donde los períodos secos exceden los tres meses de duración y los suelos son poco profundos y demasiado friables como para retener la humedad.

Enfermedades, insectos y otros agentes dañinos

El pátula es susceptible a una variedad de patógenos, incluyendo el hongo que causa el mal del vivero y a enfermedades del follaje, tallo, conos, raíz y el duramen. Entre las enfermedades más serias se encuentran. *Diplodia pinea*, *Armillariella mellea* y *Heterobasidion annosum*.^[17] La mayoría de las plagas e insectos que causan daño al Pino pátula son defoliadores, principalmente del orden *Lepidoptera*; las familias notorias son *Arctiidae*, *Lasiocampidae*, *Noctuidae* y *Saturniidae*.^[19] Las plagas de las plantaciones incluyen escarabajos adultos comedores de hojas, escarabajos adultos de la corteza (gorgojo moteado de la corteza del pino) e insectos chupadores tales como áfidos lanudos del pino.^[19]

Características y propiedades de la madera

La madera obtenida del Pino pátula se caracteriza por que su duramen es de color marrón claro rosáceo y su albura de color blanco amarillento pálido, aunque no suele ser delimitada claramente frente al duramen. Las fibras siguen una formación recta y uniforme a lo largo del tronco, por lo que se dice que es una madera de grano recto (con frecuencia espiral u ondulado), y presenta una superficie homogénea y generalmente lisa y suave al tacto, con textura fina. Los anillos de crecimiento, en ocasiones, son bien definidos, con abundantes nudos y poco resinosos, a pesar de que presentan numerosos canales de resina, los cuales son prominentes en la superficie tangencial. No obstante, recién cortada presenta olor agradable a la resina que exuda.

Composición química

El conocimiento de la composición química de la madera es útil para muchas aplicaciones: en procesos de pulpeado y blanqueo, *biopulping*, durabilidad natural, desarrollo de sales de protección de la madera y retardantes de fuego, producción de carbón, etc.; estos son solo algunos ejemplos.^[20] Las propiedades físicas y mecánicas también están relacionadas con datos sobre propiedades morfológicas y químicas, por lo que es necesario destacar que la composición química varía con la parte del árbol (raíz, tallo o rama), tipo de madera (normal, tensión o compresión), ubicación geográfica, clima y condiciones del suelo. A continuación, en la **Tabla 3-1** se presenta una caracterización química general de la especie y de su corteza.

Tabla 3-1. Típica composición química de *Pinus patula*. Expresados en porcentaje.

	Humedad	Celulosa	Hemicelulosa	Lignina	Extractivos	Cenizas
Pino pátula	---	48,75	32,75	18,5	2	---
Corteza	4	23	27	25	17,71	3,29

Tomada y modificada de^[21,22]

Propiedades físico-mecánicas

Las propiedades físicas y mecánicas están basadas en especies con duramen maduro, por lo que aquellas pueden variar mucho dependiendo del origen, la edad y las condiciones de cultivo/crecimiento.

Basado en su peso seco (a 12% de humedad) y su volumen verde, es decir, cuando está recién cortado, la madera de Pino pátula tiene una densidad promedio de 540 kg/m^3 . Sin embargo, el peso de la madera también dependerá en gran medida de su contenido de humedad (CH). En términos generales, la densidad de la madera se puede utilizar para deducir propiedades de una madera, como son dureza, resistencia, etc.

Su densidad media relativa (gravedad específica) es de $0,45 \text{ g/cm}^3$ calculada con peso seco (0% de humedad-secada al horno) y su volumen verde, es decir, cuando está recién cortada.^[23] Como esta propiedad depende en gran medida del contenido de humedad (cuanta más humedad contenga, más densa será la madera), se calcula la densidad con un contenido de humedad de 12% wt. Así, se tendría un valor de gravedad específica de 0,58.

En cuanto a la dureza *janka*, esta especie tiene un valor de 550 lbf (equivalentes a 2.450 N). Esta propiedad es útil para determinar directamente qué tanto la madera puede soportar abolladuras, golpes y desgaste, así como para determinar de forma indirecta la dificultad para que una especie sea clavada, atornillada, lijada, aserrada, entre otras. Lo anterior permite clasificarla como moderadamente dura.

De las propiedades mecánicas se puede decir que tiene un módulo de ruptura de 11.500 lbf/in^2 (79,3 MPa), módulo de elasticidad de $1.463.000 \text{ lbf/in}^2$ (10,09 GPa) y resistencia al aplastamiento de 5.160 lbf/in^2 (35,6 MPa).^[13,23]

La madera se deja aserrar, cepillar y pulir fácilmente si se aplican las velocidades y ángulos de cortes adecuados, así como las correspondientes velocidades de alimentación (cuando se alimenta demasiado rápido, tiende a dejar las superficies rugosas).^[13] Las propiedades de clavado son buenas, las de encolado son excelentes y pinta fácilmente; es fácil de secar, tanto al aire libre como al horno, pero tiende a presentar torceduras cuando hay un mal secado o nudos en la madera.

La resistencia del Pino pátula va desde no duradero a perecedero, respecto a la degradación que puede ocurrir a partir de hongos generados por ciclos de lluvia/humedad (pudrición), y es susceptible de los ataques de termitas u otros insectos perforadores/destructivos. En consecuencia, se dice que esta especie tiene un corto tiempo de vida.

Usos finales y aplicaciones

El Pino pátula es considerada una madera de buena calidad, liviana, con gran estabilidad dimensional y propiedades mecánicas bajas, lo que permite utilizarla en la elaboración de celulosa, postes y cajas de empaque, así como de chapas, contrachapados, madera aserrada y densificada.^[13] La dureza y densidad de la madera aumentan de forma marcada del centro hacia afuera; por esto, la madera exterior es apropiada para obtener madera estructural, mientras que la interior es más apropiada para la manufactura de cajas y contenedores grandes, tablillas para el techado y ensambladura de bajo costo.^[17] En general, los usos que se le pueden dar incluyen:

Ambiental

Por su potencial de rápido crecimiento y adaptación a suelos y climas extremos, se convierte en una especie prominente para la reforestación, lo que limita el avance de la erosión del suelo.^[22,24] También se planta en rompevientos, como un árbol de sombra o como uno ornamental, ya que forma un árbol atractivo con su follaje fino y ha demostrado ser bastante resistente.^[19]

Medicinal/farmacéutico

En la corteza del pino se encuentran algunos flavonoides como ácido gálico, catequina, epicatequina, procianidina, etc., los cuales le confieren propiedades antioxidantes, cardioprotectoras, antivirales, antitumorales, antialérgicas, fotoprotectoras, antiinflamatorias, anticancerígenas, entre otras.^[25,26] Adicionalmente, la infusión que se obtiene de la cocción de sus hojas, preparadas en jarabe con azúcar, alivia el catarro, y las fricciones con la resina curan el reumatismo.

Productos maderables

La madera de los árboles jóvenes se utiliza principalmente para la fabricación de cajas y la de los árboles más viejos para la construcción liviana (techos y tejados, estibas, pisos, machimbres). Para ebanistería, solo se utiliza madera de rodales bien manejados. También es adecuada para la elaboración de tableros duros, tableros de partículas y madera-lana.

Industria química

Según estudios realizados, la corteza del Pino pátula es una buena fuente de taninos, los cuales pueden ser utilizados como aditivos en los fluidos de perforación como dispersantes,^[27] y de resinas (además de sus derivados primarios colofonia y trementina) que se utilizan en la fabricación de ceras, pinturas, jabones, adhesivos y productos farmacéuticos, entre otros.^[28] Así mismo, del follaje se pueden extraer aceites esenciales, con gran potencial para diferentes aplicaciones tanto medicinales (han mostrado importantes actividades biológicas como antifúngicos, acaricidas y antiplaquetarios) como industriales.^[29,30]

En adición, la madera del Pino pátula se ha utilizado para la obtención de pulpa de fibra larga, que es la materia prima para elaboración de papel *kraft* y cartón,^[10,13,31] preferida por su bajo contenido de resina.^[10]

Producción de carbón y leña

La madera del *pátula* es un excelente biocombustible: al parecer, quema mucho más rápido que el carbón de maderas duras. Se pueden emplear ramas y pequeños tallos para la producción de carbón vegetal, posterior al aprovechamiento. La transformación de la madera en carbón puede producir una pérdida del 70% en el valor calórico de la madera del pátula, el cual puede estar entre los 17,46 y los 21,05 kJ en una base de peso seco.^[10]

3. Generalidades de la *Acacia mangium*

En su área de distribución natural se denomina *mangga hutan*, *tongke hutan* (*ceram*), *nak* (*maluku*), *laj* (*aru*), *jerri* (*irian jaya*). En América es conocida como *mangium* o acacia.

Taxonomía

- **Domino:** Eucariota.
- **Reino:** *Plantae*.
- **División:** *Tracheophyta*.
- **Clase:** *Magnoliopsida*.
- **Orden:** *Fabales*.
- **Familia:** *Leguminoceae*.
- **Género:** *Acacia*.
- **Nombre científico:** *Acacia mangium*.

Descripción botánica

Es un árbol de rápido crecimiento, grande, de 3 m de altura (su tronco recto puede ser la mitad de esta), libre de ramas hasta dos terceras partes de su altura total,^[32] aunque fuera de su hábitat natural muestra la tendencia a producir más de un eje y bifurcarse a diferentes alturas.^[33] Los árboles con un diámetro superior a 50 cm son raros.^[34] Se puede reducir a un árbol pequeño o a un arbusto grande de 7 a 10 m en sitios adversos.^[33,35] Las ramas de la parte inferior se caen naturalmente después de cierta edad; así adquiere un rasgo sobresaliente su follaje, el cual se caracteriza por ser denso.^[36]

La corteza de los árboles jóvenes es lisa y verdosa; las fisuras comienzan a desarrollarse entre los dos y los tres años. La corteza de los árboles más viejos es rugosa, dura y fisurada cerca de la base, y de color entre marrón grisáceo y marrón oscuro, con corteza interior marrón pálido.^[35,37] Las hojas, en sus primeras etapas de desarrollo, son compuestas, pero rápidamente son reemplazadas por filodios cuya apariencia es la de una hoja entera de gran tamaño (10 por 25 cm), con cuatro nervaduras longitudinales.^[33,38,39] Su sistema de raíces es superficial, razón que la convierte en una especie muy sensible al daño por el viento.^[32]

Las flores blanquecinas (o cremas) están en espigas sueltas de 5 a 12 cm de largo sobre pedúnculos de 0,6 a 1 cm de largo, solas o en pares en las axilas superiores. La flor tiene una suave y dulce fragancia; después de la fecundación, se convierte en una vaina verde que oscurece hasta moreno-marrón

en la madurez;^[35] las vainas de la semilla son anchas, lineales, enrolladas firmemente en forma de espiral cuando están maduras, ligeramente leñosas, de 7 a 8 cm de largo y 0,3 a 0,5 cm de ancho.^[34,37] Las semillas son negras y brillantes, con formas que van desde longitudinal, elíptica y ovada hasta oblonga, con un tamaño de 3 a 5 por 2 a 3 mm; están unidas a las vainas por un funicular amarillo o naranja brillante (raramente rojo) doblado para formar una arcilla aceitosa y carnosa debajo de la semilla.^[34,35]

El árbol es un hermafrodita, con tendencia a autofecundarse. Los polinizadores son generalmente insectos: *Trigona* y *Apis* spp. son los vectores polínicos activos.^[37] La *Acacia mangium* comienza a florecer y a producir semillas entre 18 y 20 meses después de la siembra. Los frutos maduros ocurren de tres a cuatro meses después del período de siembra.^[37] Al ser un árbol exótico, el ciclo de floración normal puede ser interrumpido, razón por la cual puede ocurrir durante todo el año; en su hábitat natural, las flores están presentes entre febrero y mayo y la semilla madura entre octubre y diciembre.

Origen y distribución geográfica

La especie *Acacia mangium* es originaria de Australia, Isla Molucas y Papua-Nueva Guinea.^[33,35] Se ha plantado comercialmente en muchos países del mundo tropical como Indonesia, Sri Lanka, China, Tailandia, Malasia, Nepal, Filipinas, entre otros. En América fue introducida en la década de los 80 con el fin de establecer plantaciones forestales sostenibles y productivas en suelos donde se desarrollaban actividades silvopastorales y agroforestales; fue así como se pudo distribuir geográficamente en países latinos como Panamá, Costa Rica, Colombia, Cuba, Venezuela, Ecuador, Nicaragua, República Dominicana, Honduras y Brasil.^[32,33]

Su ingreso a Colombia ocurrió en el año 1995 con el objetivo de recuperar suelos degradados por la minería.^[40] Existen plantaciones a menor escala en los departamentos de Valle del Cauca y Santander y plantaciones industriales, con fines de transformación de la madera en productos de alta comercialización, en Antioquia y Córdoba.^[32] Zonas como el Magdalena Medio, las sabanas amazónicas y los Llanos Orientales poseen condiciones climáticas que permiten el crecimiento de la especie, pero deben estudiarse las condiciones del suelo para lograr un crecimiento óptimo.^[40]

Condiciones de cultivo y adaptación

La *Acacia mangium* crece en bosques húmedos y muy húmedos, con suelos ácidos bien drenados, y con niveles de pH entre 4,5 y 6,5.^[37] Prefiere los suelos profundos de origen aluvial, pero crece también en sitios con bajos niveles de nutrientes del suelo, incluso en suelos ácidos, empobrecidos por el uso prolongado en actividades agropecuarias o abandonados porque son infértiles o presentan cambios estructurales; sin embargo, es intolerante a las condiciones salinas y a la sombra.^[35]

Las áreas donde se han obtenido mejores resultados con las plantaciones de *Acacia mangium* presentan un promedio anual de precipitación de entre 1.500 a 3.000 mm, en el rango de altitud que va desde 0 hasta unos 800 msnm;^[37] comúnmente, las zonas climáticas de tierras bajas tropicales y húmedas en las que se encuentra esta especie se caracterizan por una estación seca de corta duración (máximo seis meses consecutivos con < 40 mm de lluvia).^[34,35] En cuanto al rango de temperatura, va de 10 a 24 °C (en los meses más fríos) y de 30 a 40 °C (en los meses más calientes).^[41]

Se caracteriza por una adaptación a suelos ácidos, resistencia a sequías, rápido crecimiento y alta productividad forrajera, apta para programas silvopastoriles y reforestación, e ideal para recuperar suelos áridos degradados; además, presenta asociación simbiótica con *Rhizobium* y hongos micorrízicos vesículo-arbusculares.^[41]

La especie no crece continuamente a lo largo del año; el crecimiento parece frenar o cesar en respuesta a la combinación de bajas precipitaciones y temperaturas frías.^[35] Se ha reportado una alta mortalidad de árboles de *Acacia mangium* de cinco años de edad después de haber estado expuestos durante un largo período a temperaturas bajas de aproximadamente 5 y 6 °C con lluvia fría.^[33,35]

Enfermedades de insectos y otros agentes dañinos

En general, la *Acacia mangium* está relativamente libre de enfermedades y plagas graves. Se ve afectada principalmente por la pudrición del corazón, causada por hongos blancos, en especial por los basidiomicetos *Corticium salmonicolor*, que atacan el tejido vivo de las raíces y pueden causar la muerte del árbol o los síntomas del declive de la corona.^[35,37] La putrefacción se

limita a pequeños bolsillos en el duramen, pero ocasionalmente se encuentra en toda la longitud del tronco, sobre todo en los árboles más viejos; en las ramas y el follaje también se presenta afectación: las hojas se marchitan, toman coloraciones parduzcas y mueren (quedan adheridas a las ramas por cortos periodos de tiempo).^[37,42]

Otros microorganismos que atacan el fuste, y generan lesiones y agallas, lo que lleva a una disminución de la calidad de la madera que se va a comercializar, son: *Uromycladium tepperianum*, *Ceratocystis* sp., *Thelephora ramarioides*, *Gigaspora margarita*, *Glomus etunicatum* y *Scutellospora calospora*, *Ganoderma* spp., e insectos del género *Xyleborus*.^[32,42] Los insectos que pueden atacar a las plántulas de vivero incluyen saltamontes, termitas y gusanos, que causan diversos tipos de daños.^[35,37]

Algunos autores mencionan que las enfermedades que ocurren con mayor frecuencia en las especies de acacias causan principalmente manchas, necrosis foliares, chancros y podredumbre del corazón, decoloraciones y presencia de royas.^[42]

Características y propiedades de la madera

La acacia produce una madera dura, con una densidad específica de 0,65 a 0,69 g/cm³.^[41] Su madera es característica por presentar poca albura, de color crema claro. El duramen es café claro, con bandas café oscuro, y un tinte rosáceo, sin presentar una diferencia marcada con la albura.^[35]

La madera de la acacia es difusa y porosa (grandes poros sin disposición específica, pocos). El grano es recto e interconectado superficialmente; la textura es fina a mediana y uniforme.^[35] Es clasificada como una especie tropical de fibra corta.

Composición química

Los resultados de análisis de la composición lignocelulósica de especies de *Acacia mangium* se presenta en la **Tabla 3-2**.

Tabla 3-2. Composición química de especies de *Acacia mangium*.

	Celulosa (%)	Hemicelulosa (%)	Lignina (%)	Extractivos (%)	Cenizas (%)
Corteza	46,5	24,4	27,64	4,45	0,22
	46,7	24,7	26,5	4,7	---
	22,4	36,2	14,7	17,8	---

Tomada y modificada de^[43,44]

El contenido de lignina de la madera de la *Acacia mangium* mostró un 27,6%, un valor que está por encima del rango típicamente encontrado en maderas duras (que es del 20 al 26%). Los valores altos de lignina y hemicelulosa indican una mayor cantidad de carbono fijo; así mismo, un alto contenido de lignina y extractivos polifenólicos contribuye al alto consumo químico requerido para deslignificar químicamente esta madera y al bajo rendimiento de pulpa, en comparación con otras maderas duras.

Propiedades físico-mecánicas

Se caracteriza por ser una madera dura, resistente y densa, frecuentemente comparada con la madera de Teca (*Tectona grandis*), de alta calidad, y con la del nogal (*Cordia alliodora*).^[32]

Una de las características necesarias para la utilización de madera es el contenido de humedad. Aquella con alto contenido de humedad seca más lentamente que aquellas que tienen menor humedad y son más sensibles a los defectos en el secado. Por lo general, el contenido de humedad del tallo de la *Acacia mangium* es extremadamente alto, no solo para el duramen, también para la albura: los valores característicos van de 90 a 100% para el duramen y de 80 a 90% para la albura.^[45]

Se ha reportado baja densidad para esta especie, con un valor de 380 a 480 kg/m³ (450 a 690 kg/m³ a 15% de contenido de humedad),^[35] el cual disminuye con el aumento de la altura del árbol y con la juventud de la madera, lo que reduce su potencial de utilización.^[46]

Su resistencia a la flexión es de 1.100 lbf (4.890 N), su módulo de ruptura es de 14.230 lbf/in² (98,2 MPa) y su módulo de elasticidad (MOE) es de 1.605.000 lbf/in² (11,07 GPa). Según las características anteriores, se considera que esta madera es moderadamente fuerte, con un valor medio de resistencia a la flexión de 65 N/mm² en condiciones verdes.^[46]

La madera del *Acacia mangium* presenta un mayor incremento en los defectos (grietas, acanaladuras y encorvaduras) después de secado en horno.^[47] No obstante, su secado al aire es fácil (no presenta problemas en su anatomía) y al momento de aserrar, tornear, lijar, taladrar, cepillar y clavar, o en operaciones de maquinado, es fácil de trabajar y se producen buenos resultados.^[32]

Usos finales y aplicaciones

La *Acacia mangium* es una especie exótica que actualmente tiene un alto valor ambiental y comercial dada su importancia, pues no solo es apta para la forestación, ya que ayuda a recuperar suelos, sino que también es utilizada para la obtención de productos a partir de su madera. Su potencial se debe, además, a su tasa de crecimiento extremadamente vigorosa, a su tolerancia a suelos altamente ácidos y bajos en nutrientes, a su capacidad para crecer razonablemente bien donde la competencia es severa (por ejemplo, pastizales), a la relativa ausencia de enfermedad, a la facilidad de establecimiento en el cultivo, a su fácil trabajabilidad y a la belleza de su madera, lo que asegura la comercialización de sus productos de forma sostenible en el tiempo y a bajo costo.^[32,48]

Alimentación

Las semillas germinadas pueden ser cocidas y comidas como vegetales. El follaje puede ser usado también como forraje para alimento del ganado.^[34,37]

Pasta de papel, papel *kraft* y pulpa química

Esta especie de madera ha sido reconocida como una excelente materia prima para la fabricación de papel debido a su alto rendimiento y a su fibra de alta calidad.^[49] La mayoría de las plantaciones a gran escala se utilizan para

la producción de pasta de papel, pasta *kraft* (para bolsas, papel de embalaje, cartón) y pasta química (para corrugado, productos de grado medio y alto).

Medicinal/farmacéutico

La corteza de la *Acacia mangium* contiene cantidades considerables de fenoles antioxidantes: se reporta de 18 a 39% wt de su contenido.^[46] Esto es de gran importancia para la industria, ya que los extractos, ricos en componentes polifenólicos, están siendo utilizados cada vez más como activos en sustancias para composiciones cosméticas y farmacéuticas. De igual manera, el tanino del *Acacio mangium* tiene una buena reactividad hacia el formaldehído y, por lo tanto, buenas propiedades adhesivas.^[46,49]

Ambientales

Su valor agregado es su capacidad como regeneradora de suelos con alto grado de desgaste o erosión; actúa sobre estos como fijadora de nitrógeno y fósforo, lo que permite la recuperación del estado natural (de los suelos) y de sus propiedades para que sean aprovechados en diferentes actividades agrícolas.^[32,35] Esta fijación del nitrógeno en el suelo se debe a que los árboles de *Acacia mangium* forman una simbiosis con las bacterias de este, del género *Rhizobium*, dando así lugar a nódulos radiculares en los que las bacterias transforman el nitrógeno libre en compuestos orgánicos e inorgánicos que contienen nitrógeno; esto permite aumentar la actividad biológica del suelo y rehabilita sus propiedades físicas y químicas.^[35,37]

Con su follaje denso, conservado durante todo el año, la *Acacia mangium* es un árbol útil para la sombra, cribado y cobertura vegetal.^[37] También puede ser plantado como cortavientos o cortafuegos, ya que los árboles con diámetros de 7 cm o más son comúnmente resistentes al fuego.^[35]

Combustible

El poder calorífico de la madera se encuentra entre 4.800 y 4.900 kcal/kg, un valor relativamente alto que hace a esta especie un buen combustible, ya que proporciona un carbón de buena calidad y es adecuado para la fabricación de briquetas de carbón y carbón activado.^[37,46] Así mismo, las ramas caídas y las hojas muertas pueden utilizarse como combustible.^[35] Sin embargo, los árboles jóvenes hacen pobre la leña.

Productos maderables

La forma de crecimiento de la *Acacia mangium* hace que las especies sean adecuadas para una amplia gama de productos de madera maciza, incluyendo muebles y gabinetes, obras estructurales ligeras, herramientas agrícolas y cajas. Incluso, se ha utilizado para la construcción de viviendas. Así mismo, esta madera se utiliza en la elaboración de tableros de partículas, enchapados decorativos, madera contrachapada y laminada e, incluso, tableros madera-cemento.^[46]

4. Generalidades de la *Tectona grandis* (Teca)

En Colombia es conocida como Teca. En su área de distribución natural se denomina *sagun, sagon, saguan, skhu, toak, shilp tru, Indian oak*. En países de habla inglesa, *teak wood, indian oak, teak tree*.^[50]

Taxonomía

- **Domino:** Eucariota.
- **Reino:** *Plantae*.
- **División:** *Magnoliophyta*.
- **Clase:** *Magnoliopsida*.
- **Orden:** Lamiales.
- **Familia:** *Verbenaceae*.
- **Género:** *Tectona*.
- **Nombre científico:** *Tectona grandis*.

Descripción botánica

Es un árbol grande y caducifolio que alcanza más de 30 m de altura y un diámetro de 2,5 m en condiciones favorables.^[51,52] El tallo es generalmente cilíndrico y alto, pero con la tendencia a bifurcarse (presenta depresiones y abultamientos irregulares en el fuste); a menudo aparecen contrafuertes, es decir, ensanchamientos en la base producidos por una hinchazón exagerada de las raíces.

La corteza es de color marrón claro o gris, claramente fibrosa, con fisuras longitudinales superficiales.^[50] Se considera que la Teca no presenta una raíz central definida, sino un sistema de tres a seis raíces laterales que pueden extenderse lateralmente hasta 15 m del tallo y alcanzar verticalmente hasta 1 m de profundidad.^[51,52] Generalmente, los árboles presentan dominancia apical, que se pierde con la madurez o cuando florece a temprana edad, por lo que se da una capa más amplia con ramas numerosas.^[52]

Las hojas son opuestas, caducas, elípticas u ovoides, muy grandes (de 11 a 85 cm de largo y de 6 a 50 cm de ancho, aunque las hojas jóvenes son de hasta 1 m de largo), de color verde oscuro en el haz y marrón claro y afelpado en el pecíolo.^[51,52] Las hojas se desprenden por tres o cuatro meses durante la última mitad de la estación seca, y dejan las ramas desnudas.^[50,51]

Las flores son pequeñas, de unos 8 mm de diámetro, de color malva a blanco y dispuestas en grandes cabezas florecientes, de unos 45 cm de largo y ubicadas en las ramas más altas, en la parte no sombreada de la corona.^[51] El fruto es una drupa lila redonda, dura y leñosa, cuadrilobulada con pericarpio afelpado que encierra una semilla bastante dura, verde pálido al principio, luego marrón en la madurez. Cada fruta puede contener de cero a cuatro semillas de 5 mm de largo.^[51] La floración se da en los meses de junio a septiembre y la producción de frutos al inicio del verano, de febrero a abril.^[50, 52]

Origen y distribución geográfica

La *Tectona grandis* es nativa y originaria de India, Indonesia, Myanmar, Tailandia y Laos.^[50,52,53] La especie fue introducida en Trinidad y Tobago en 1913 con semillas procedentes de Tenasserim, en Birmania. Luego fue ampliamente distribuida, mediante la exportación de semillas, a República Dominicana, Jamaica, Costa Rica, Cuba, Colombia, Venezuela, Haití, Puerto Rico, Ecuador, Guyana Francesa y México.^[52,54] En Colombia, las zonas de la cuenca del Magdalena y del Cauca, la costa atlántica, Córdoba, Antioquia y algunas tierras de los Llanos Orientales son consideradas aptas para producir una Teca de buena calidad.^[53]

Condiciones de cultivo y adaptación

En la mayor parte de su área de distribución, la Teca se planta en bosques frondosos, húmedos y secos, por debajo de una altitud de 1.200 m, con precipitaciones anuales de 1.200 a 2.500 mm y una temperatura anual de entre 14 y 36 °C, con una media de 24 °C.^[50,55]

Debido a que la Teca no se desarrolla bien en suelos pesados, compactados, duros, planos y arcillosos, los bosques naturales de esta aparecen principalmente en terrenos montañosos y ondulados, en los que la roca madre está formada por basalto, granito, esquisto, gneis, caliza y arenisca.^[55] Así mismo, los suelos lateríticos infértiles y los profundos secos y arenosos no son aptos para esta especie. Prefiere suelos coluviales y aluviales, profundos, bien drenados y fértiles, con un pH de entre 6,5 y 8, y un contenido relativamente alto de calcio y fósforo.^[50,52] Por poseer hojas grandes que captan gran cantidad de agua de las precipitaciones, las plantaciones de Teca pueden provocar la erosión del suelo si se planta en sitios con pendiente sin utilizar un sistema de control de escorrentía.^[52]

Se considera que las precipitaciones, la humedad del suelo, la temperatura, la luz, la formación geológica y las condiciones del suelo (profundidad, drenaje, estado de humedad, fertilidad del suelo y contenido de calcio y magnesio) son factores importantes, controlantes del crecimiento de la Teca.^[50,52,55]

Enfermedades de insectos y otros agentes dañinos

Por lo general, las plantaciones puras de Teca son vulnerables a las plagas defoliantes, sobre todo cuando las condiciones de la estación no son óptimas; se aconseja que dichas plantaciones sean mezcladas con otras especies arbóreas, de manera que se reduzca el riesgo de plagas y enfermedades.^[55] Se reportan estudios en los cuales se analizan la actividad anitermita y la relación existente entre esta característica con la edad de la madera y el contenido de extractivos del árbol; se encuentra que la resistencia a las termitas, a los hongos y a la intemperie se debe a la existencia de extractivos tóxicos. Es así como la madera joven no dura más de cinco años si está en contacto con el suelo, debido a que su contenido de extractivos es menor comparado con una madera madura.^[56,57]

El principal ataque a los tallos viene del insecto *Calothermes tectonae*; al primer signo de ataque, los árboles deben ser talados y quemados porque no se conoce ningún insecticida eficaz. Otras plagas de plantación son la *Eutectona machaeralis* (esqueletizador de Teca) y las perforadoras de madera *Xyleutes ceramicus* en Tailandia y *Xyleborus destruens* en Indonesia.^[50] No obstante, la Teca se ha considerado como el estándar de oro para la resistencia a la pudrición y su duramen está clasificado como muy duradero.

Características y propiedades de la madera

La madera obtenida de la Teca se caracteriza porque su duramen es de color opaco amarillento cuando está fresca y marrón dorado o marrón grisáceo oscuro cuando se expone, a menudo con rayas de color grisáceo u oscuro;^[58] el color de la albura es blanco amarillento o amarillo pálido marrón.^[58,59] El grano es recto, ondulado o ligeramente entrelazado, y presenta una superficie homogénea y, generalmente, con textura bastante gruesa y áspera, con bajo brillo natural.^[58,59] Las superficies de madera crudas, sin terminar, tienen un tacto ligeramente aceitoso o grasiento debido a los aceites naturales. Los anillos de crecimiento son distintos: de porosos a semiporosos.^[58]

En fin, su madera es una de las más famosas del mundo y es reconocida por su estabilidad dimensional y durabilidad extrema, que también se resiste a la descomposición, incluso cuando no está protegida por las pinturas y conservantes. Ha sido llamada la reina de las maderas, pues su apariencia se hace más bella con el paso de los años, por lo que es muy apetecida para la fabricación de muebles de alto valor y de embarcaciones lujosas.

Composición química

La durabilidad natural es una característica importante de la madera y es la que determina principalmente su uso; la variabilidad se ha observado tanto en las partes del árbol como entre individuos de la misma especie. En la Teca, la durabilidad natural se atribuye a la presencia de extractivos tóxicos, principalmente quinona.^[60,61] La importancia relativa del contenido

extractivo y sus compuestos químicos radica en que estos imparten resistencia a la pudrición de la madera de Teca.

El conocimiento sobre la estructura de la madera y sobre su corteza es esencial para estimar su uso potencial y, por tanto, su valorización. La composición química típica de la *Tectona grandis* se presenta en la **Tabla 3-3**.

Tabla 3-3. Composición química de la *Tectona grandis*.

	Holocelulosa	Lignina	Extractivos	Cenizas
Teca	59,65 (0,85)	30,91 (1,41)	13,67 (1,32)	0,78 (0,13)
Duramen	56,2 (3,1)	32,4 (1,0)	9,2 (1,9)	---
Albura	57,5 (3,8)	32,2 (1,5)	10 (3,0)	---
Corteza	47	20,0	10,7	18,5

Tomada y modificada de^[61,63]

Propiedades físico-mecánicas

La Teca ha sido reconocida como una madera de alta calidad debido a sus excelentes propiedades; así, se ha convertido en una de las maderas más valiosas del mundo, junto con el cedro (*Cedrela odorata*) y la caoba (*Swietenia macrophylla*). Esta madera es única en cuanto que no causa herrumbre o corrosión cuando está en contacto con metales; por lo cual es muy usada en la industria de construcción naval, tanques y toneles, y otros objetos que requieran alta resistencia a los ácidos.

La madera verde de Teca presenta una densidad de 1,02 g/cm³ y seca al horno de 0,57 g/cm³.^[52] Tiene una contracción radial muy baja de entre 0,7 y 1,5%, y una contracción tangencial de entre 1,1 y 2,5% desde la condición de verde a la de aire seco. En general, la Teca se seca muy bien, con pocos defectos, excepto que puede sufrir cambios de color; además, la temperatura inicial alta debe evitarse.

Esta madera es moderadamente fuerte; sus propiedades mecánicas incluyen su dureza *janka*, con un valor típico de 1.070 lbf, módulo de ruptura con un valor de 14.080 lbf/in² (97,1 MPa), módulo de elasticidad

característico de 1.781.000 lbf/in² (12,28 GPa) y resistencia al aplastamiento de 7.940 lbf/in² (54,8 MPa).^[59]

En general, la madera es dura y fina, fácil de trabajar en casi todos los aspectos, pero requiere algún esfuerzo, principalmente por su alto contenido de sílice en sus células (hasta el 1,4%), que tiene un efecto pronunciado en los bordes de corte.^[59,64] A pesar de sus aceites naturales, la Teca suele pegarse y terminar bien;^[58,59] en algunos casos, puede ser necesario limpiar la superficie de la madera con un disolvente antes del encolado/acabado para reducir los aceites naturales en la superficie de la madera.

En cuanto a la durabilidad y tratabilidad, la albura es sensible al ataque de los escarabajos, quienes reducen la madera a un polvo muy fino; el duramen se clasifica entre durable y muy durable dependiendo de las condiciones de exposición.^[64] La albura es fácil de tratar con conservante, mientras que el duramen no.

Usos finales y aplicaciones

La madera de Teca es adecuada para una amplia variedad de propósitos, entre ellos, para la cubierta de embarcaciones, para muebles y para otros elementos de interior. Al ser clasificada como muy resistente a la actividad *teredo*, la Teca es excelente para la construcción de puentes y otras obras en contacto con el agua, tales como muelles, embarcaderos y compuertas en agua dulce.^[51,52,64] Esta madera también se ha utilizado extensamente para la construcción de viviendas, específicamente en la carpintería interior y exterior (ventanas, puertas de panel macizo, enmarcado), y también para los pisos expuestos a tráfico peatonal de ligero a moderado. Otros usos de la Teca incluyen instrumentos musicales, juguetes, tallado, mesas de laboratorio y cocina, cubas, chapas y madera contrachapada.

No obstante, hay otros usos que se les pueden dar a la madera, a la corteza e, inclusive, a las hojas:

Ornamental

La *Tectona grandis* se cultiva de vez en cuando en países tropicales como ornamental por sus hojas grandes y por sus racimos de flores esparcidos.^[50]

Medicinal/farmacéutico

La Teca es considerada como un componente importante en muchas de las medicinas tradicionales. Se utiliza contra la bronquitis, la bilis, la hipercidez, la diabetes, los trastornos lipídicos, las úlceras, la lepra y la helmintiasis, y como astringente; además, es antimicrobiana y anticancerígena, y ayuda a la cicatrización.^[51,65] Finalmente, el polvo de madera se ha utilizado contra el dolor de cabeza, la hinchazón, la dermatitis, entre otras.^[50]

Los diferentes extractos de diversas partes de la Teca muestran propiedades expectorantes, antiinflamatorias y antihelmínticas. Así, se considera que la madera de Teca es refrescante, laxante, sedante al útero grávido y útil en el tratamiento de hemorroides, leucoderma y disentería; alivia la sed y posee propiedades antihelmínticas y expectorantes, y es un tónico para el cabello.^[51] La corteza es astringente: se utiliza en la bronquitis. La raíz es utilizada para la anuria y la retención de orina. El aceite del fruto es utilizado en el tratamiento contra la sarna y otras enfermedades de la piel, y para promover el crecimiento del pelo.^[66] Las flores se utilizan en la bronquitis, la bilisidad y las descargas urinarias. Las flores y las semillas son diuréticas.^[66] El extracto de la hoja se utiliza extensamente en el tratamiento de varios tipos de heridas, especialmente de quemadura.^[51]

Las propiedades de la Teca como antioxidante, antiinflamatoria, analgésica y antimicrobiana/antibacteriana se deben a la presencia de compuestos fenólicos como ácidos fenólicos, flavonoides y taninos.^[51]

Combustible

La madera de Teca se ha utilizado en la fabricación de carbón y leña, pero hoy en día se considera demasiado valiosa para esta aplicación (los restos de poda y otros residuos sí pueden ser utilizados).

Por su excelente estabilidad, facilidad de trabajo y, sobre todo, buenas propiedades de resistencia, especialmente a la pudrición y a la descomposición, no es de extrañar que la Teca se encuentre entre las maderas más deseadas del mundo.

Referencias bibliográficas

1. G. Gellerstedt, M. y G. Henriksson, "Wood chemistry and biotechnology", *Pulp and Paper Chemistry and Technology*, vol. n.º 1, 2009, p. 320.
2. R. Rowell, "Handbook of wood chemistry and wood composites", USA: Taylor & Francis Group, 2005.
3. R. B. Miller, "Structure of wood", *Wood Handbook: wood as an engineering material*, Madison: WI: USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, pp. 1, 2-4, 1999.
4. J. C. F. Walker, "Primary wood processing. Principles and practice", segunda edición, Netherlands: Springer, 2006.
5. M. H. Ramage, H. Burridge, M. Busse-Wicher, *et al.* "The wood from the trees: the use of timber in construction", *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 68, pp. 333-359, 2017.
6. N. Charon, B. Omais y J. Barbier, "Analyse moléculaire des produits issus de la transformation de la biomasse lignocellulosique", *Journée thématique La Thermodynamique et Les Bioprocédés*, p. 32, 2012.
7. J. Kuk kim y K. Pal, "Recent advances in the processing of wood-plastic composites", primera edición, Berlín: Springer International Publishing, 2010.
8. R. C. Brown, "Thermochemical processing of biomass: conversion into fuels, chemicals and power", primera edición, Chichester, Reino Unido: John Wiley & Sons, Ltd, 2011.
9. J. S. Tumuluru, S. Sokhansanj, J. R. Hess, C. T. Wright y R. D. Boardman, "A review on biomass torrefaction process and product properties for energy applications", *Ind. Biotechnol.*, vol. 7, pp. 384-401, 2011.
10. C. Ospina, R. Hernández, E. Restrepo, *et al.* "Guías silviculturales para el manejo de especies forestales con miras a la producción de madera en la zona andina colombiana: Pino pátula". Serie Cartillas Divulgativas, Manizales, 2011.
11. A. M. Rojas, "Pinos colombianos: ocho nativos en peligro", *Rev. El Mueble y la Madera*, vol. Edición 63, pp. 18-25, 2009.
12. Centre for Agriculture and Biosciences International (CABI), *Pinus patula* (Mexican weeping pine), 2014. [En línea]. Disponible: <http://www.cabi.org/isc/datasheet/41682>.

13. S. A. Nigro, “*Pinus patula* Schlttdl. & Cham”, Plant Resources of Tropical Africa (PROTA), Wageningen, Netherlands, 2008.
14. Y. Jácome, “Potencial productivo de un ensayo de progenies de 4.ª generación de selección de *Pinus patula* Schl. et Cham. en potrero de García, municipio de Tlacolulan”, Universidad Veracruzana, 2011.
15. A. Peralta, “Efecto del tipo de envase en la calidad y costo de producción de *Pinus patula* Schiede ex Schlechtendal & Chamisso var. *pátula* en vivero”, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 2007.
16. J. Melorose, R. Perroy y S. Careas, “Evaluación del comportamiento de procedencias de *Pinus patula* Schlect. et Cham en dos sitios en las provincias de Imbabura y Pichincha”, 2015.
17. A. J. Gillespie, “*Pinus patula* Schiede & Deppe. *Patula pine*. *Pinaceae*. *Pine family*”, USDA Forest Service, Southern Forest Experiment Station, Institute of Tropical Forestry (SO-ITF-SM; 54), p. 5, 1992.
18. J. Berrío, A. Dávila, V. Giraldo, *et al.* “La reforestación en Colombia: visión del futuro”. Fedemaderas & Fundación Konrad Adenauer, 2010.
19. Infonet, “Infonet-biovision”, Mexican weepieg pine, 2016. [En línea]. Disponible: <http://www.infonet-biovision.org/EnvironmentalHealth/Trees/Mexican-weeping-pine>.
20. M. A. E. Santana y E. Y. A. Okino, “Chemical composition of 36 Brazilian Amazon forest wood species”, *Holzforschung*, vol. 61, pp. 469-477, 2007.
21. J. Moncada, C. A. Cardona, J. C. Higueta, *et al.* “Wood residue (*Pinus patula* bark) as an alternative feedstock for producing ethanol and furfural in Colombia: Experimental, techno-economic and environmental assessments”, *Chem. Eng. Sci.*, vol. 140, pp. 309-318, 2016.
22. E. A. Gómez, L. A. Ríos y J. D. Peña, “Madera, un potencial material lignocelulósico para la producción de biocombustibles en Colombia”, *Inf. Tecnol.* Vol. 23, n.º 6, pp. 73-86, 2012.
23. The wood database, “The wood database”, *Patula pine*. [En línea]. Disponible: <http://www.wood-database.com/patula-pine/>.
24. E. Trujillo, “¿Con cuál especie reforestar en Colombia?”, *Rev. El Mueble y la Madera*, vol. Edición 89, pp. 14-19, 2015.
25. J. A. Gallo-Corredor y R. A. Sarria-Villa, “Condiciones de extracción de taninos a partir de la corteza de *Pinus patula* y estandarización del método cromatográfico (CLAR) para la determinación de catequina”, *J. Cienc. e Ing.*, vol. 1, n.º 1, pp. 7-9, 2009.
26. M. Rosales-Castro, R. F. González-Laredo, N. E. Rocha-Guzmán, *et al.* “Evaluación química y capacidad antioxidante de extractos polifenólicos de cortezas de *Pinus cooperi*, *P. engelmannii*, *P. leiophylla* y *P. teocote*”, *Madera y Bosques*, vol. 15, n.º 3, pp. 87-105, 2009.

27. F. Chaidid de la Hoz y P. A. Osma, “Estudio de la factibilidad del uso de los taninos del pino como dispersante en fluidos de perforación”, Universidad Industrial de Santander, 2011.
28. J. A. Gallo-Corredor y R. A. Sarria-Villa, “Obtención de colofonia y trementina a partir de resina de pino de la especie pátula y posterior evaluación de los parámetros de calidad”, J. Cienc. e Ing., vol. 5, n.º 1, pp. 88-91, 2013.
29. J. A. Gallo-Corredor, R. A. Sarria-Villa y P. A. Moreno Quirá, “Caracterización del follaje de *Pinus patula* como materia prima para la extracción de aceites esenciales”, J. Cienc. e Ing., vol. 7, n.º 1, pp. 54-58, 2015.
30. E. Ioannou, A. Koutsaviti, O. Tzakou y V. Roussis, “The genus *Pinus*: a comparative study on the needle essential oil composition of 46 pine species”, Phytochem. Rev., vol. 13, n.º 4, pp. 741-768, 2014.
31. L. P. Uranga, “Crecimiento y rendimiento maderable en plantaciones de *Pinus patula* en Zacualpan, Veracruz”, Colegio de Postgraduados, Institución de Enseñanza e Investigación en Ciencias Agrícolas, 2014.
32. C. Obregón, “La *Acacia mangium*: una especie promisoría”, Revista MM, vol. 49, pp. 1-5, 2005.
33. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, “*Mangium: Acacia mangium* Willd, especie de árbol de uso múltiple en América Central”, Informe Té, Turrialba, Costa Rica, 1992.
34. Cabi, “Invasive species compendium”, *Acacia mangium* (brown salwood), 2014. [En línea]. Disponible: <http://www.cabi.org/isc/datasheet/2325>.
35. H. Krisnawati, M. Kallio y M. Kanninen, “*Acacia mangium* willd. Ecology, silviculture and productivity”, Cent. Int. For. Res., p. 26, 2011.
36. F. A. Tacha-Mahecha, “Plan de manejo y aprovechamiento forestal de *Acacia mangium* en la finca El Delirio”, 2016.
37. C. Orwa, A. Mutua, R. Kindt, *et al.* “*Acacia mangium* Willd”, Agroforestry Database 4.0., pp. 1-5, 2009.
38. F. Useche-Triviño y S. A. Azurero-Ramírez, “Tres especies arbóreas propicias para los sistemas silvopastoriles en el piedemonte llanero”, Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD CEAD), 2013.
39. T. Clavero, “Serie técnica: árboles forrajeros. *Acacia mangium*. Leguminosa promisoría para suelos ácidos”, Centro de Transferencia de Tecnología en Pastos y Forrajes, Facultad de Agronomía, Universidad del Zulia, Maracaibo, 1998.
40. E. A. Mateus G, “*Acacia mangium*. Una especie para sembrar en serio”, Rev. El Mueble y la Madera, vol. Edición 80, pp. 1-5, 2013.

41. G. F. C. Rozo-Rey, "Multiplicación clonal masiva *in vitro* de *Acacia mangium* Willd, como estrategia para la recuperación de suelos deprimidos", Universidad del Tolima, 2014.
42. G. P. Díaz, "Enfermedades de importancia económica asociadas a plantas de *Acacia mangium* Willd", Pontificia Universidad Javeriana, 2013.
43. P. C. Pinto, D. V. Evtuguin y C. P. Neto, "Chemical composition and structural features of the macromolecular components of plantation *Acacia mangium* wood", *J. Agric. Food Chem.*, vol. 53, n.º 20, pp. 7856-7862, 2005.
44. Y. B. Hoong, M. T. Paridah, Y. F. Loh, *et al.* "A new source of natural adhesive: *Acacia mangium* bark extracts co-polymerized with phenol-formaldehyde (PF) for bonding Mempisang (*Annonaceae* spp.) veneers", *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 31, n.º 3, pp. 164-167, 2011.
45. K. Yamamoto, O. Sulaiman, C. Kitingan, *et al.* "Moisture distribution in stems of *Acacia mangium*, *A. auriculiformis* and hybrid acacia trees", *Japan Agric. Res. Q.*, vol. 37, n.º 3, pp. 207-212, 2003.
46. T. K. Dhamodaran y K. C. Chacko, "Growth and wood characteristics of *Acacia mangium* grown in kerala", Peechi, Thrissur, 1999.
47. C. Tenorio-Monge y R. Moya-Roque, "Consideraciones y recomendaciones prácticas para mejorar la calidad de la madera seca de *Acacia mangium* Willd", *Tecnol. en Marcha*, vol. 24, n.º 4, pp. 30-38, 2011.
48. B. Maslin, "Kew: royal botanic garden", *Acacia mangium* (brown salwood), 2004. [En línea]. Disponible: <http://www.kew.org/science-conservation/plants-fungi/acacia-mangium-brown-salwood>. [Accedido: 20-Feb-2017].
49. L. Zhang, J. Chen, Y. Wang, D. Wu y M. Xu, "Phenolic extracts from *Acacia mangium* bark and their antioxidant activities", *Molecules*, vol. 15, n.º 5, pp. 3567-3577, 2010.
50. C. Orwa, A. Mutua, R. Kindt, *et al.* "*Tectona grandis*", *Agroforestry Database 4.0.*, pp. 1-6, 2009.
51. R. B. Nidavani y M. Am, "Teak (*Tectona grandis* Linn.): a renowned timber plant with potential medicinal values", *Int. J. Pharm. Pharm. Sci.*, vol. 6, n.º 1, pp. 48-54, 2014.
52. E. Chávez y W. Fonseca, "Teca (*Tectona grandis* L. f.) especie de árbol de uso múltiple en América Central", Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, (Catie), Costa Rica, p. 47, 1991.
53. J. L. Ordóñez-Jiménez, "Plantaciones de Teca: negocio en alza", *Rev. El Mueble y la Madera*, pp. 20-25, 2010.
54. W. Ladrach, "Management of teak plantations for solid wood products", USA, 2009.
55. D. Pandey y C. Brown, "La Teca: una visión global", *Unasylva*, vol. 51, pp. 3-13, 2000.

56. G. Lukmandaru, "Variability in the natural termite resistance of plantation teak wood and its relations with wood extractive content and color properties", *Indones. J. For. Res.*, vol. 8, n.º 1, pp. 17-31, 2011.
57. A. Berrocal Jiménez y L. V. Rojas Acuña, "Resistencia de la madera de Teca (*Tectona grandis* L. f.) proveniente de plantaciones forestales ante el ataque de termitas de madera seca *Cryptotermes brevis* (Walker)", *Kurú Rev. For.*, vol. 4, n.º 10, pp. 1-15, 2007.
58. A. S. Nordahlia, S. C. Lim, H. Hamdan y U. M. K. Anwar, "Wood properties of selected plantation species: *Tectona grandis* (teak), *Neolamarckia cadamba* (Kelempayan/Laran), *Octomeles sumatrana* (Binuang) and *Paraserianthes falcataria* (Batai)", n.º 54. Ministry of Natural Resources and Environment, Malaysia, pp. 1-8, 2014.
59. The wood database, "The wood database", Teak. [En línea]. Disponible: <http://www.wood-database.com/teak/>.
60. F. B. Niamk, N. Amusant, J. P. Charpentier, *et al.* "Relationships between biochemical attributes (non-structural carbohydrates and phenolics) and natural durability against fungi in dry teak wood (*Tectona grandis* L. f.)", *Ann. For. Sci.*, vol. 68, n.º 1, pp. 201-211, 2011.
61. R. Moya, B. Bond y H. Quesada, "A review of heartwood properties of *Tectona grandis* trees from fast-growth plantations", *Wood Sci. Technol.*, vol. 48, n.º 2, pp. 411-433, 2014.
62. I. Baptista, I. Miranda, T. Quilhó, *et al.* "Characterisation and fractioning of *Tectona grandis* bark in view of its valorisation as a biorefinery raw-material", *Ind. Crops Prod.*, vol. 50, pp. 166-175, 2013.
63. I. Miranda, V. Sousa y H. Pereira, "Wood properties of teak (*Tectona grandis*) from a mature unmanaged stand in East Timor", *J. Wood Sci.*, vol. 57, n.º 3, pp. 171-178, 2011.
64. T. M. Wong, "A dictionary of malaysian timber", segunda edición, Malaysia: Forest Research Institute Malaysia, 2002.
65. M. Ghaisas, V. Navghare, A. Takawale, V. Zope, M. Tanwar y A. Deshpande, "Effect of *Tectona grandis* linn. on dexamethasone-induced insulin resistance in mice", *J. Ethnopharmacol.*, vol. 122, n.º 2, pp. 304-307, 2009.
66. C. P. Khare, "Indian medicinal plants: an illustrated dictionary", India: Springer Science & Business Media, LLC., 2007.
67. WoodStairs. Recuperado de <https://www.woodstairs.com/how-to-evaluate-wood/>, 2012.

Aplicaciones energéticas de la madera

La madera es, sin duda, la primera fuente de energía renovable y sostenible para el ser humano: garantiza seguridad energética, acceso a zonas no interconectadas, mínimo de impactos ambientales (mitigación de cambio climático) y reducción de la dependencia de los combustibles fósiles.^[1-3] Al igual que con cualquier fuente de energía, existen limitaciones en su uso y aplicabilidad; hay que tener en cuenta que compite no solo con los combustibles fósiles, sino con otras fuentes de energía renovables como la eólica, solar, mareomotriz, geotérmica.^[2]

La madera almacena efectivamente la energía de la luz solar en los enlaces químicos de sus componentes estructurales y la libera cuando se rompen los enlaces entre las moléculas adyacentes de carbono, hidrógeno y oxígeno por algún proceso de digestión, combustión o descomposición;^[4-6] en otras palabras, las plantas absorben el dióxido de carbono de la atmósfera, así como el agua y los nutrientes de los suelos, para convertirlos en hidrocarburos mediante la fotosíntesis. El carbono se libera a la atmósfera cuando la madera se consume como combustible, cerrando así este ciclo biológico.^[4,7] Dicha energía se puede aprovechar mediante procesos de conversión, mecánica, bioquímica y termoquímica, para obtener así energía útil, como calor y electricidad, o portadores de energía (biocombustibles sólidos, gaseosos o líquidos).

Las rutas bioquímica y termoquímica implican la degradación de la estructura recalcitrante de la pared celular de la madera, lo que genera fragmentos de lignina, hemicelulosa y celulosa.^[8,9] En la **Figura 4-1** se describe el proceso de aprovechamiento de la madera, incluyendo la fuente de obtención, los productos obtenidos luego de la transformación y sus usos energéticos finales.

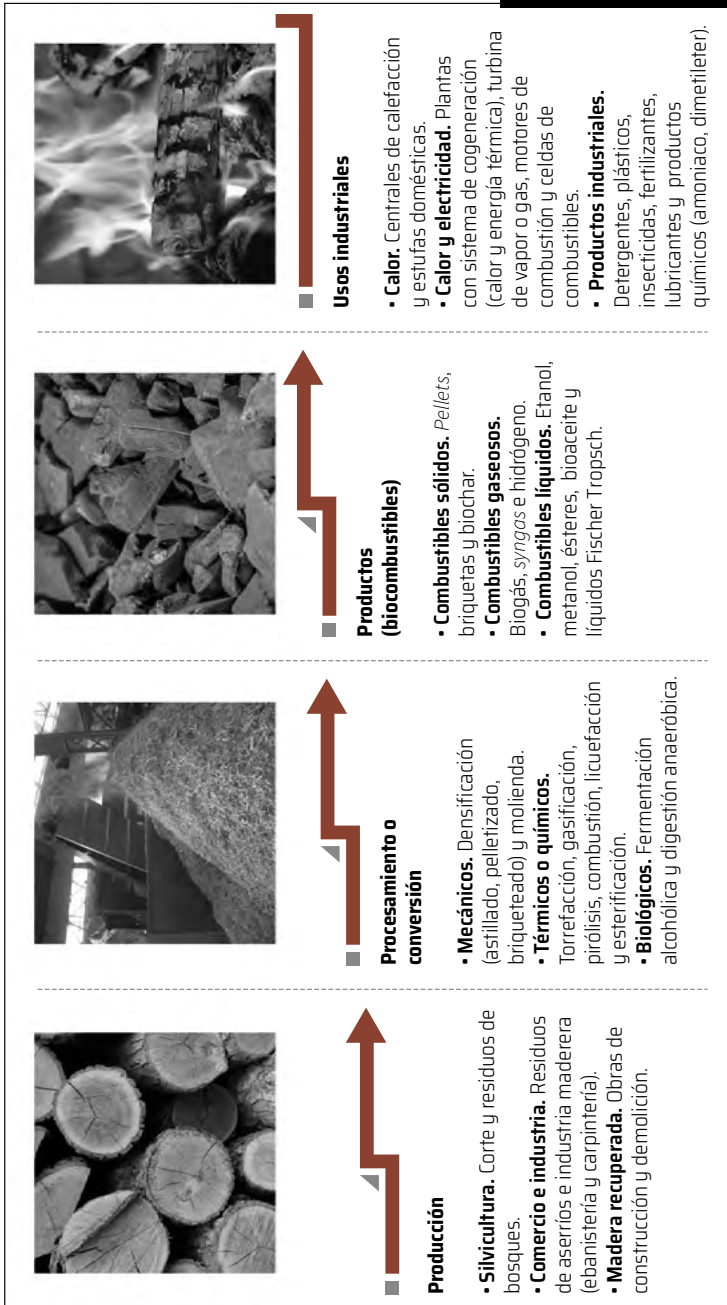


Figura 4-1. Transformación de la madera desde su origen hasta su uso final en aplicaciones energéticas.
Tomada y modificada de (1,10,11)

La conversión mecánica se considera un pretratamiento de la madera cuyo fin es reducir el tamaño de partícula típicamente a un tamaño fino, con un incremento del área superficial, lo que lleva a una reducción de la cristalinidad de la celulosa y, por ende, a una reducción del grado de polimerización.^[12] Dentro de los procesos mecánicos se incluye el secado, la molienda y la densificación, donde ocurre una transformación física o química para obtener un combustible con propiedades óptimas y garantizar la utilización eficaz y sostenible de la madera en otros procesos de conversión.^[13,14]

La conversión bioquímica consta del uso de organismos (bacterias) o catalizadores biológicos (enzimas) en dos procesos principales: digestión aeróbica o anaeróbica (para producir combustible como bioetanol y biogás) y fermentación (para producir etanol).^[15-17] En la conversión termoquímica se requiere una fuente de calor y un catalizador químico para convertir la biomasa en biocombustibles sólidos, líquidos y gaseosos, que luego se sintetizan en energía útil o en productos químicos deseados.^[18,19] Dentro de las tecnologías termoquímicas se encuentran la pirólisis, la gasificación y la combustión, que difieren principalmente en las condiciones de operación (rangos de temperatura y presión, ausencia o no de oxígeno), uso o no de catalizador y requerimiento del material de alimentación seco.^[17] La ruta de conversión termoquímica es la opción más atractiva debido a su mayor eficiencia, mayor versatilidad y a las amplias opciones de material de alimentación que se pueden usar; además, comparada con la conversión bioquímica, es mucho más rápida, en términos del tiempo de reacción requerido.^[6,16,20]

En general, los principales productos obtenidos de la conversión de madera, vía mecánica, bioquímica o termoquímica, se agrupan en tres tipos:^[17]

- **Combustibles sólidos.** Madera torrefactada, *biocoke*, biochar, *pellets* o briquetas.
- **Combustibles líquidos.** Etanol, biodiésel, metanol, bioaceite (tar).
- **Combustibles gaseosos.** Biogás ($\text{CH}_4 + \text{CO}_2$), *syngas* ($\text{CO} + \text{H}_2$), otros gases (CO , H_2 , CH_4 , CO_2 , H_2).

Los productos mencionados anteriormente tienen el potencial para ser utilizados en tres importantes aplicaciones energéticas: generación de calor y electricidad, producción de biocombustibles para el transporte y síntesis de productos químicos industriales, por lo que la madera se convierte en una fuente de energía versátil,^[5,15,21] capaz de satisfacer las necesidades energéticas actuales.

La naturaleza renovable y sostenible de la madera es la principal motivación para utilizar el material en la generación de energía (electricidad verde y calor), así como para la producción de combustibles y productos químicos.^[21,22] Sin embargo, su uso eficiente se encuentra limitado por algunas de sus propiedades: estructura tenaz y fibrosa, composición heterogénea, alto contenido de humedad y de oxígeno, bajo valor calórico, naturaleza higroscópica, baja densidad aparente, lo cual genera altos volúmenes e inconvenientes en el manejo, almacenamiento, transporte y utilización en su forma original;^[16,23,24] así que son necesarios procesos de pretratamiento para mejorar su valor como combustible.^[25] Dentro de estos procesos se incluye el secado, la molienda, la densificación y la torrefacción para su transformación física o química, de manera que la madera se utilice eficaz y sosteniblemente en la combustión directa o cocombustión con carbón, gasificación, pirólisis y en otras conversiones.^[13,14]

La densificación o pelletización es un proceso de aplicación de una fuerza mecánica (prensado) para compactar residuos como aserrín, virutas o chips en partículas sólidas cilíndricas de tamaño uniforme y homogéneo, tales como *pellets* o briquetas, lo que permite mejorar la durabilidad y las características de la madera (principalmente su densidad de bulo y su densidad energética), convirtiéndola en un portador de energía provechoso en términos de transporte, almacenamiento y manipulación.^[7,26,27] Inicialmente, la madera debe ser secada hasta lograr un máximo de 10% en contenido de humedad, para luego ser molida/pulverizada por medios mecánicos (partículas típicamente de 3,2 a 6,4 mm) y comprimida en *pellets* para aumentar su densidad. Se utiliza un agente de unión con el fin de obtener una mejor resistencia mecánica y durabilidad; generalmente, la lignina es el aglutinante natural, pero la madera debe ser calentada entre 50 y 150 °C, de modo que la lignina se encuentre blanda. Finalmente, los *pellets* de madera son

moldeados con un diámetro aproximado de un lápiz (12 a 15 mm) y menos de una pulgada de largo.^[17,27-29]

Por otro lado, en la torrefacción, la biomasa es calentada a una temperatura de entre 200 y 300 °C en una atmósfera de nitrógeno a bajas velocidades de calentamiento (menores de 50 °C/min) y tiempo de residencia menores de una hora.^[30,31] Durante la torrefacción se produce un producto sólido parcialmente carbonizado o carbón vegetal (biochar), un líquido condensable que incluye agua, lípidos (terpenos y fenoles), compuestos orgánicos (alcoholes y furanos) y ácido acético, y, finalmente, gases no condensables, principalmente dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO) y cantidades de hidrógeno y metano.^[17,24,32,33] La torrefacción altera la estructura química de la biomasa: aumenta su contenido de carbono, mientras que reduce su contenido de oxígeno e hidrógeno, lo que lleva a un aumento de la densidad de energía.^[34] Por ello, la motivación de la torrefacción es maximizar los rendimientos de masa y energía, con reducción de las relaciones O/C y H/C.^[34,35] Esta tecnología ha sido de gran interés en los últimos años en los sectores de generación de energía (cocombustión), gasificación y producción de acero (como agente reductor), que la utilizan para el pretratamiento térmico, con el fin de destruir la estructura fibrosa y la tenacidad de la madera y aumentar su poder calorífico.^[7,23,36]

A continuación, se describen tecnologías bioquímicas y termoquímicas que permiten obtener productos usados directamente para producir calor (caldera) y electricidad (turbinas) o procesados para dar un “nuevo” producto químico o combustible.

1. Generación de calor y electricidad

La quema de madera y materiales agrícolas en chimeneas y estufas simples para cocinar y calentar el espacio se ha utilizado durante miles de años y es común en todo el mundo por ser una fuente vital de calor, aunque menos deseable que las técnicas avanzadas de conversión desde el punto de vista de la contaminación atmosférica, las repercusiones en la salud y la eficiencia que resulta de una combustión incompleta.^[1,37] Comúnmente, la madera

es considerada como combustible neutro de carbono cuando se quema, y ofrece ventajas importantes debido a la alta volatilidad del combustible y a la alta reactividad tanto de este como del carbón resultante.^[38]

Existen tecnologías bioquímicas y termoquímicas que permiten obtener calor, el cual puede ser transformado a través de motores de calor en energía mecánica y, por lo tanto, en energía eléctrica.

Combustión directa

Es la forma más simple y común de convertir la madera en energía; se ocurre la oxidación completa de todo el contenido orgánico del combustible, usando aire/oxígeno para obtener energía térmica y gases de combustión, que consisten principalmente en dióxido de carbono y agua.^[19] Los gases calientes de la combustión (a una temperatura entre 900 y 1.000 °C) pueden ser usados para calefacción directa, como calentamiento de agua o generación de energía eléctrica.^[39] La práctica más común consiste en la producción de vapor de alta presión en una caldera (típicamente 20 a 250 bar). El vapor se expande a una presión inferior a través del motor de expansión y proporciona una potencia mecánica para conducir un generador de electricidad.^[17,39]

En la **Figura 4-2** se puede apreciar el esquema general de combustión de la madera y su uso final; comienza con la quema del material, de la que se obtienen gases de combustión que deben ser limpiados, por ejemplo, en un ciclón, para eliminar partículas contaminantes; finalmente, se intercambia calor con un fluido de proceso y, a su vez, se impulsa una turbina de vapor que genera electricidad.^[14,40] Este proceso es relativamente simple y económico.

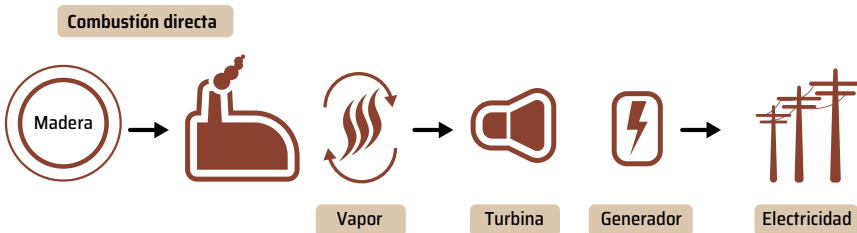


Figura 4-2. Proceso de combustión directa de madera a electricidad.

Tomada y modificada de^[41]

Actualmente, se ha optado por la producción simultánea de calor y energía térmica (*combined heat and power, CHP*), conocida como cogeneración, con el fin de mejorar la eficiencia de combustible,^[34] tal y como se observa en la **Figura 4-3**. Luego de la combustión de la biomasa, los gases de combustión se limpian de partículas en un dispositivo específico (por ejemplo, un ciclón) y fluyen a un intercambiador de calor que proporciona calor a un fluido de trabajo que ejecuta un ciclo de energía para *CHP* o se transmite directamente a un usuario térmico.^[34,40]

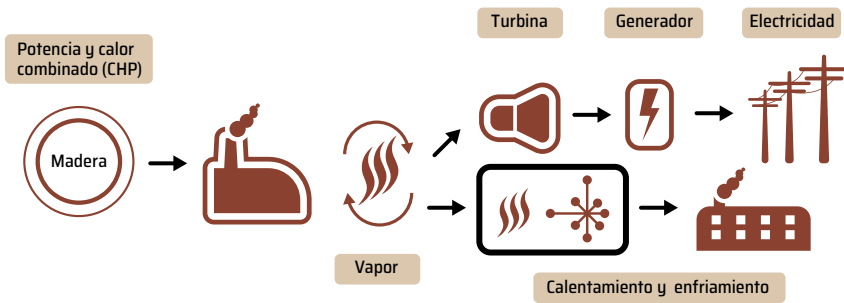


Figura 4-3. Sistema de cogeneración de madera para electricidad.

Tomada y modificada de^[41]

En la mayoría de centrales eléctricas se genera calor como un subproducto, lo que contribuye a la relativamente baja eficiencia de conversión general del combustible en electricidad.^[34] Sin embargo, en los procesos de cogeneración, “el calor residual rechazado” se recupera para su uso en la calefacción urbana. La cogeneración convierte alrededor del 90% de la energía potencial de la biomasa en energía útil.^[42]

Gasificación

Es otra alternativa para la generación de energía mediante motores convencionales de encendido por chispa o de doble combustible de encendido por compresión.^[19] La gasificación es la conversión térmica de material orgánico en gases de combustión por la oxidación parcial de la madera a altas temperaturas, generalmente en un rango de 600 a 1.000 °C.^[43]

Se requiere un agente oxidante (aire, oxígeno, vapor o sus combinaciones), el cual reacciona con el carbono sólido y los hidrocarburos más pesados (compuestos oxigenados como fenoles y ácidos; líquidos como tar, aceite y nafta) de la madera para convertirlos en gases de bajo peso molecular como CO y H₂.^[17, 43, 44] El gas de síntesis producido (*syngas*) es una mezcla inflamable de gases de monóxido de carbono, hidrógeno, metano, nitrógeno, dióxido de carbono y cantidades más pequeñas de hidrocarburos (CHs), compuestos inorgánicos y cenizas.^[15,19,44]

Para la producción y uso del *syngas* se sigue este procedimiento: a) gasificación del combustible, b) limpieza y acondicionamiento del gas producido (reformado de alquitrán, enfriamiento/enfriamiento de gas de síntesis y eliminación de gas ácido [CO₂ y H₂S] con posterior recuperación de azufre) y c) uso del gas de síntesis como portador de energía en celdas de combustible o síntesis de productos químicos.^[17,38,43,44] El gas de síntesis tratado puede usarse para la producción de electricidad o para producir hidrógeno/CO de alta pureza a través de unidades de purificación tales como la adsorción por oscilación de presión.^[43] Dicha secuencia del proceso se esquematiza en la **Figura 4-4**.

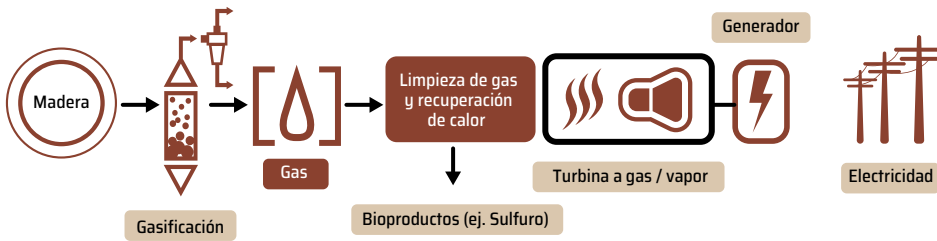


Figura 4-4. Gasificación de madera y aprovechamiento de productos generados.
Tomada y modificada de^[41]

La principal ventaja de la ruta de gasificación es la alta eficiencia de conversión de energía en comparación con la combustión directa, lo que resulta en menores costos de operación.^[45] Así mismo, permite la reducción significativa de contaminantes nocivos en el aire como NOx y SOx.

Pirólisis rápida

Es la descomposición termoquímica de la biomasa en gases líquido y sólido por calentamiento rápido, en ausencia total de agentes oxidantes, llevada a cabo en un rango de temperatura de 300 y 650 °C.^[17,19] La pirólisis implica una ruptura de moléculas grandes y complejas en varias moléculas más pequeñas.^[20] Sus productos se clasifican en tres tipos principales: líquido (principalmente compuestos oxigenados, aromáticos, agua, productos de bajo grado de polimerización, alquitranes), sólido (char, que consiste en carbón y cenizas) y gases (que incluyen CO₂, H₂O, CO, C₂H₂, C₂H₄, C₂H₆ y C₆H₆).^[13,36] Las cantidades relativas de estos productos dependen de las condiciones de proceso, y se resalta la velocidad de calentamiento y la temperatura final alcanzada por la biomasa.^[17]

La principal motivación de la pirólisis es maximizar la producción de líquidos, mientras se minimiza el rendimiento de char. Sin embargo, se puede condicionar el proceso para favorecer la producción de los otros productos.^[20,34] Así, para un mayor rendimiento de char, el proceso debe ser a baja temperatura, baja tasa de calentamiento y largo tiempo de residencia (pirólisis lenta); si el propósito es maximizar el rendimiento de bioaceite, se requiere temperatura intermedia, alta velocidad de calentamiento y corto tiempo de residencia del gas (pirólisis rápida); y, finalmente, para maximizar el rendimiento de gas combustible, el proceso debe ser a altas temperaturas, velocidad de calentamiento baja y corto tiempo de residencia de gas (pirólisis intermedia).^[17,20,38,46] Lo anterior se representa en la **Figura 4-5**.

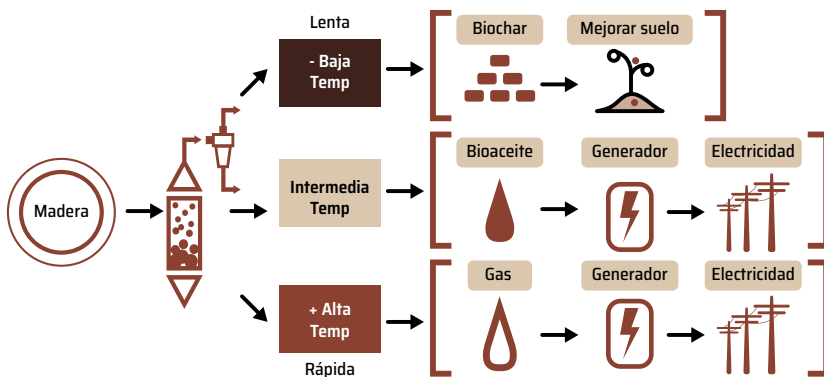


Figura 4-5. Productos obtenidos bajo específicas condiciones de pirólisis y su uso final. Tomada y modificada de^[41]

El bioaceite, obtenido de la pirólisis rápida, es un líquido orgánico, color marrón oscuro (casi negro), que fluye libremente y está constituido por una mezcla muy compleja de hidrocarburos oxigenados y una gran cantidad de agua (~25%), que es en parte la humedad original en la biomasa y otra del producto de reacción.^[17,47,48] La composición del bioaceite depende de la biomasa (madera) utilizada, así como del pretratamiento de la materia prima (tamaño de partícula, forma, contenido de humedad y cenizas) y condiciones de pirólisis (temperatura, velocidad de calentamiento, tiempo de residencia).^[47] El bioaceite es renovable y limpio, y ofrece una alternativa “verde” en muchas aplicaciones en las que se utiliza petroaceite, principalmente como fuente de energía y como materia prima para la producción de “química verde”.

El bioaceite puede ser quemado en calderas para calentar edificios o en generadores para producir electricidad, sin alterar considerablemente los diseños de las máquinas.^[20] Sin embargo, para utilizar bioaceite puro directamente en los quemadores y calderas se requiere un precalentamiento a 70-80 °C antes de la combustión debido a que exige mucha energía para el encendido (aunque una vez encendido, se quema con una llama autosostenida y estable) y puede causar problemas en turbinas y motores diésel por sus propiedades variables, contenido de cenizas y bajo número cetano.^[40,49,50] El bioaceite usado para la generación de calor a través de la combustión se considera carbono neutral porque todo el dióxido de carbono liberado en tal combustión es capturado por las plantas y los árboles durante el proceso de la fotosíntesis.^[50]

Adicionalmente, los vapores de la pirólisis pueden ser quemados directamente en una turbina de gas o condensados a bioaceite para alimentar un motor diésel convencional y generar electricidad.^[20] Así, la combinación de pequeños motores diésel con pirólisis de madera es una alternativa prometedora para la generación de energía distribuida.

Por su parte, el biochar (biocarbón), un sólido negro obtenido de la pirólisis lenta, es quemado comúnmente para procesos de calor, vapor o electricidad. Contiene materiales inorgánicos y orgánicos sin convertir, que se producen principalmente de la descomposición de la lignina.^[51]

Debido a su alto contenido de carbono, su gran superficie específica y su estructura porosa, el biocarbón ofrece una nueva alternativa para la captura

y secuestro de carbono, es decir, compensa las emisiones de gases de efecto invernadero actuando como un sumidero de carbono y reduciendo el óxido nítrico (NO) y el metano (CH₄), junto con las emisiones de CO₂,^[49,50,52,53] así mismo, mejora la fertilidad del suelo por la retención de nutrientes debido a la adsorción de cationes, y es considerado un adsorbente alternativo para la eliminación de contaminantes del agua, especialmente metales pesados.^[34,53]

Digestión anaeróbica (AD)

Es la conversión biológica de la madera mediante la descomposición del material inorgánico por acción de bacterias en ausencia de oxígeno, lo que genera un digestato y una mezcla de gases conocido como biogás, que contiene principalmente metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂) y cantidades insignificantes de sulfuro de hidrógeno (H₂S) y amoníaco. La concentración de CH₄ típicamente varía de 40 a 70% v/v, dependiendo de los tipos de material de alimentación y del reactor.^[40,54]

El proceso consta de diferentes etapas:^[54,55] al comienzo del proceso, se produce la hidrólisis, cuando enzimas extracelulares, que son producidas por los microbios hidrolíticos, descomponen los polímeros orgánicos complejos a monómeros solubles simples. Las proteínas, lípidos y carbohidratos son hidrolizados a aminoácidos, ácidos grasos de cadena larga y azúcares, respectivamente. Estas pequeñas moléculas se convierten luego por bacterias fermentativas (agentes acidógenos) en una mezcla de ácidos grasos volátiles (AGV) y otros productos menores, como son los alcoholes. Las bacterias acetogénicas convierten aún más el AGV en acetato, dióxido de carbono o hidrógeno, que proporcionan sustratos directos para la metanogénesis, el último paso del proceso de AD para la producción de metano.

El uso más común del biogás es la combustión directa y es utilizado para los mismos fines que el gas natural, por lo que puede ser distribuido a través de las redes existentes o comprimido para utilizarse como combustible en vehículos y en celdas de combustible de óxido sólido para generar electricidad.^[40] Se considera que es potencialmente una alternativa más limpia y sostenible que el gas natural.^[40] El proceso de aprovechamiento del biogás se resume en la **Figura 4-6**.

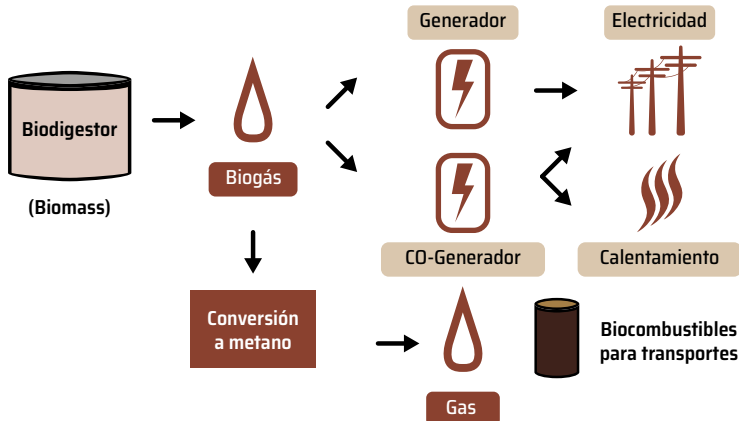


Figura 4-6. Proceso para la obtención de biogás a partir de digestión anaeróbica.
Tomada y modificada de^[41]

Antes de su utilización, el biogás debe someterse a un proceso de mejora, donde todos los contaminantes, como H_2S y CO_2 , son eliminados, lo que lleva a un aumento en el contenido de metano del 50 al 75% v/v a más de 95% v/v; se obtiene un combustible de mayor calidad llamado biometano, químicamente idéntico al gas natural.^[19,55]

La producción de metano por digestión anaeróbica es la forma más eficiente de manejo y generación de energía a partir de biomasa, en términos de relación de energía *output/input* (28,8 MJ/MJ), en comparación con todas las demás tecnologías de producción de energía a través de biológicos y termoquímicos, rutas de procesos de conversión de energía.^[56]

En este orden de ideas, el reto para la producción de energía a partir de la madera, se basa en aumentar su contribución en el suministro de energía en los países desarrollados y en vía de desarrollo, aun cuando se introduzcan tecnologías modernas de producción de bioenergía.

2. Producción de biocombustibles para el transporte

Varios combustibles para el transporte pueden ser producidos a partir de madera; esta realidad ayuda a aliviar la demanda de productos derivados del petróleo y a mejorar el perfil de emisiones de gases de efecto invernadero del sector transporte. El término biocombustibles generalmente se refiere a los combustibles líquidos para el sector del transporte, pero también se incluyen aquellos usados en combustión directa para la producción de electricidad. Los biocombustibles líquidos renovables para el transporte han atraído recientemente la atención en diferentes países por su capacidad de renovación, sostenibilidad, disponibilidad, reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y biodegradabilidad.

Fermentación

Es un proceso biológico anaeróbico que, dependiendo de las condiciones y materia prima utilizada, requiere la presencia de microorganismos (usualmente levaduras) para fermentar el azúcar en alcohol, ácido láctico u otros productos finales.^[38] El azúcar proviene de la hidrólisis de la celulosa y hemicelulosa de la madera. La lignina no se convierte y se aprovecha en la obtención de productos de valor o en la generación de energía.^[9,57]

Generalmente, en la producción de etanol a partir de biomasa se destacan cuatro etapas: pretratamiento, hidrólisis, fermentación y destilación, como se puede ver en la **Figura 4-7**. Los materiales celulósicos, como madera o materiales forestales, requieren pretratamiento debido a su estructura recalcitrante, generada principalmente por el alto contenido de lignina, porosidad y alto grado de cristalinidad de la celulosa.^[9,57,58] La lignina actúa como una barrera física en las paredes celulares de la planta, reduciendo así el acceso/ataque de las enzimas. La presencia de hemicelulosa reduce el tamaño medio de poro del sustrato y, por lo tanto, reduce también la accesibilidad de la celulosa a las enzimas hidrolíticas. Se ha demostrado que la celulosa de alta cristalinidad es más resistente a la hidrólisis enzimática, por lo que no solo consume gran cantidad de enzima, sino que también da como

resultado un bajo rendimiento de digestibilidad enzimática.^[59] Por ello, para aumentar la sensibilidad al ataque químico, microbiológico o enzimático de la biomasa, es necesario reducir el contenido de lignina y la cristalinidad de la celulosa e incrementar el área superficial.^[59-61]

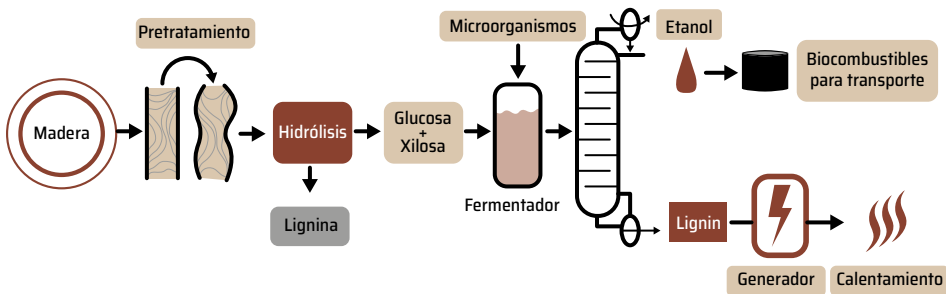


Figura 4-7. Ruta bioquímica para producción de etanol a partir de biomasa lignocelulósica.

Tras el pretratamiento, se lleva a cabo la hidrólisis (o sacarificación), proceso en el cual la celulosa se convierte en glucosa.^[62] Toda o parte de la hemicelulosa se ha separado y se hidroliza a los azúcares monoméricos y oligoméricos en la etapa de pretratamiento; el resto pueden ser degradados a ácidos débiles, derivados de furano y compuestos fenólicos. Como consecuencia de la hidrólisis, la lignina se separa de la solución de celulosa o hemicelulosa como residuo sólido y la celulosa y hemicelulosa se degradan en glucosa y xilosa, que posteriormente son fermentadas por una variedad de microorganismos, generalmente bacterias.^[9,63]

El producto de la fermentación es una mezcla de etanol y agua con una concentración de etanol de 8% en peso, aproximadamente; así mismo, se produce una cierta cantidad de dióxido de carbono como subproducto. Dado que el contenido de etanol en la corriente de producto de fermentación es aún muy baja, la destilación y la deshidratación se utilizan como los últimos pasos para alcanzar la concentración deseada (etanol hidratado o anhidro).^[9,64]

El bioetanol o alcohol etílico tiene alto índice de octano, que permite el aumento de la relación de compresión del motor para una mayor eficiencia térmica; es decir, puede soportar presiones internas significativamente más

altas que la gasolina, antes de ser sometido a predetonación.^[38,65] El número de octano es una medida de la calidad y capacidad antidetonante del combustible para evitar las detonaciones y explosiones, de tal manera que se libere o se produzca la máxima cantidad de energía útil. Los combustibles con un número de octano más alto son los preferidos en los motores de combustión interna con encendido por chispa.^[38]

Sin embargo, el etanol presenta desventajas significativas, que incluyen: bajo poder calorífico comparado con la gasolina, corrosividad con metales como el aluminio, baja luminosidad de la llama, presión de vapor más baja (haciendo arranques en frío difícil), miscibilidad con el agua, toxicidad para los ecosistemas y aumento de presión de vapor (y las emisiones de evaporación) cuando se mezcla con la gasolina.^[38,65] Por ello, para mejorar sus propiedades, el etanol generalmente se utiliza mezclado con gasolina, lo que se conoce como “gasohol”; la mayoría de los motores de gasolina funcionarán bien con mezclas de etanol al 10% (E10).^[38,66] Adicionalmente, esta mezcla permite reducir la emisión de gases de efecto invernadero, particularmente el dióxido de azufre, hidrocarburos no quemados y carcinógenos.^[56]

Transesterificación

Consiste en la reacción entre un triglicérido (molécula de glicerol esterificada por tres moléculas de ácidos grasos) y un alcohol ligero (metanol o etanol), en presencia de un catalizador (alcalino, ácido o enzimático); se obtienen como productos ésteres de etilo (el nombre químico para el biodiésel) y glicerina (un subproducto valioso vendido generalmente para ser utilizado en jabones y otros productos).^[67-69] En general, se suele usar metanol como alcohol de sustitución, en cuyo caso el biodiésel estará compuesto por ésteres metílicos.^[70] Debido al bajo costo con una mejor disponibilidad, los catalizadores de NaOH y KOH se usan ampliamente para la reacción.^[70]

Aunque el biodiésel es frecuentemente asociado con la conversión química de los aceites vegetales y de semillas, hay un incentivo poderoso para utilizar materiales lignocelulósicos como una fuente para la producción de productos químicos y combustibles, con el fin de evitar una escasez de los aceites comestibles y un aumento del precio de los alimentos.^[71,72]

Los residuos agroindustriales se pueden utilizar como fuente nutricional para los microorganismos que acumulan lípidos intracelulares: los aceites microbianos, o aceites de células individuales (SCOs), están constituidos por lípidos producidos por los microorganismos oleaginosos (incluyendo levaduras, mohos y microalgas) y son considerados como candidatos prometedores debido a que su composición de ácidos grasos es similar a la de aceite vegetal.^[72]

El biodiésel ha sido adoptado como un combustible alternativo en motores diésel, sin modificaciones;^[38,73] al producirse únicamente a partir de aceites vegetales o grasas animales, es renovable, biodegradable y no tóxico; además, genera mínimas emisiones de partículas, CO₂ y azufre.^[38,73] Puede ser utilizado como un combustible para vehículos en su forma pura, pero se utiliza generalmente como aditivo para diésel con el fin de reducir los niveles de partículas, monóxido de carbono e hidrocarburos de los vehículos que usan motor de este tipo (diésel).^[65,74]

Otro proceso relevante para la conversión de madera en combustibles para el transporte es la gasificación acoplada a una síntesis Fischer-Tropsch para obtener producto líquido.

Gasificación combinada con la síntesis de Fischer-Tropsch (FTS)

Permite obtener hidrocarburos líquidos, que incluyen gasolina y diésel de alta calidad, a partir de la síntesis de *syngas*,^[75] como se observa en la **Figura 4-8**. En general, los productos de FTS son hidrocarburos de cadena lineal (principalmente alifáticos), ramificados, insaturados, y alcoholes primarios se forman en cantidades menores. La distribución del producto obtenido a partir de FTS incluye hidrocarburos ligeros como metano, eteno y etano, olefinas, parafinas, aldehídos, cetona, queroseno y diésel, y compuestos oxigenados, que pueden, a su vez, ser convertidos en productos tales como detergentes sintéticos, margarina sintética y aceite de cocina.^[19,38,52]

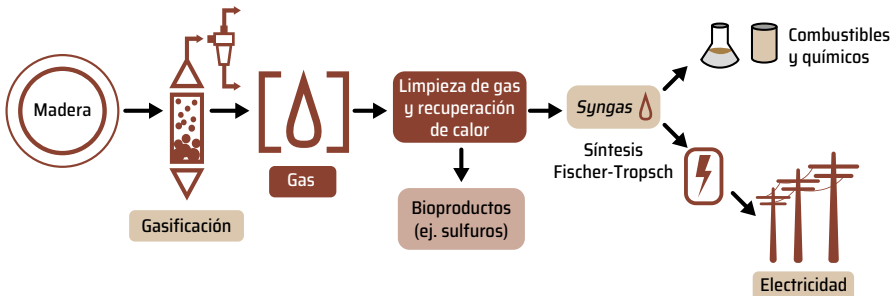


Figura 4-8. Proceso de gasificación Fischer-Tropsch para obtener combustibles, electricidad y productos químicos.

Tomada y modificada de^[41]

El proceso FT requiere catalizadores, basados principalmente en hierro, cobalto, rutenio y potasio, que actúan a altas presiones entre 2,5 y 4,5 Mpa, y temperaturas entre 200 y 350 °C.^[17,45,52] Los catalizadores basados en Co (cobalto) requieren un mayor contenido de H₂ en el gas de síntesis para la producción de combustible; no obstante, generan conversiones más altas que los catalizadores basados en Fe (hierro).^[75]

Ciertos productos obtenidos por conversión bioquímica o termoquímica tienen el potencial de ser usados no solo para generación de energía eléctrica, sino como biocombustibles como el biogás (producto de digestión anaeróbica), gas de síntesis (obtenido de gasificación) y bioaceite (producto de pirólisis rápida).

Se considera que el biogás o biometano tiene un alto potencial como combustible para vehículos, comparado con otros biocombustibles, debido a que puede utilizarse en motores *Stirling* sin ningún proceso de actualización; estos, a su vez, pueden usar gas con una concentración molar de CH₄ de 35%.^[76] Así mismo, tiene impactos ambientales positivos: reducción de emisiones de dióxido de carbono y NOx (dependiendo del sustrato material de alimentación y del origen de la electricidad: fósil o renovable), y reducción de emisión de partículas de hollín, incluso en comparación con los motores diésel muy modernos, equipados con filtros de partículas.^[55]

El bioaceite presenta una excelente oportunidad para la producción de energía de alta eficiencia; esfuerzos suficientes han sido dedicados a la investigación y desarrollo de la aplicación de bioaceite para la generación

de calor y electricidad y de su uso como combustible de transporte. Como combustible, tiene numerosas ventajas competitivas sobre los combustibles fósiles; entre ellas, bajas emisiones de óxido de nitrógeno (NOx) (genera 50% menos emisiones de NOx que un *fuel-oil* liviano en turbinas de gas y turbinas diésel convencionales) y facilidad de transporte (mayor cantidad en una misma unidad de volumen).^[77] No obstante, el bioaceite presenta problemas relacionados con sus propiedades: bajo poder calorífico, incompatibilidad con combustibles convencionales, altos contenidos de oxígeno, agua, sólidos y ceniza, alta viscosidad, volatilidad incompleta e inestabilidad química.^[47,78]

Algunas de esas deficiencias se pueden mejorar utilizando métodos físicos relativamente simples, mientras que otras requieren un procesamiento químico más complejo para eliminar grupos químicos oxigenados, de modo que el bioaceite sea compatible con la actual infraestructura, diseñada para combustibles de hidrocarburos. Parece ser que es más sencillo utilizar bioaceite como combustible para el transporte en combinación con el diésel directamente.^[51,78]

Para finalizar, es importante destacar que la principal ventaja de los bio-combustibles radica en que son una fuente de energía limpia, biodegradable y sostenible, por lo que contribuyen a la seguridad energética, a la mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero, a la mejora de la calidad del aire y a la búsqueda de nuevos recursos energéticos con mejor control de los residuos; en adición, tienen beneficios económicos y energéticos debido a que ayudan a reducir el uso de combustibles fósiles y, por tanto, la dependencia de las importaciones.^[69,79]

3. Síntesis de productos químicos industriales

El concepto de desarrollo de una biorrefinería para producir múltiples productos tiene un potencial prometedor, que apunta hacia una economía sostenible basada en recursos renovables.^[38,80] La madera no solo puede sustituir a los combustibles fósiles, sino que también puede proporcionar un sustituto renovable en muchos productos industriales y materiales

derivados del petróleo o del gas natural (espumas de base biológica, plásticos, polímeros, fertilizantes, lubricantes, materiales de embalaje, pinturas y recubrimientos, papel y cartón son algunas de las posibilidades).^[80,81]

El *syngas* tiene el potencial para ser utilizado en la fabricación de productos químicos como los siguientes:

- **Amoníaco.** Importante producto químico utilizado para un gran número de aplicaciones, incluyendo la producción de fertilizantes, desinfectantes, ácido nítrico, refrigerantes, producción de plásticos y fibras como poliuretano, poliamidas y poliacronitrilo.^[17] Además, es usado para la producción de explosivos y alimento animal. La síntesis de amoníaco es llevada a cabo mediante una reacción N_2-H_2 sobre un lecho de catalizador a alta presión (entre 100 y 250 bar) y a temperatura moderada (entre 350 y 550 °C). Las especificaciones de contenido de gases oxigenados (CO y CO_2), que típicamente están presentes en el *syngas*, son muy estrictas, por lo que la concentración no debe superar 20 ppmV.^[45]
- **Hidrógeno.** Combustible limpio, sin emisiones de CO_2 , que puede ser fácilmente utilizado en pilas de combustible para la generación de electricidad y en motores de combustión interna. Tiene propiedades muy especiales como combustible para el transporte, incluyendo velocidad de combustión rápida, alto número de octano, potencial de formación de ozono y no toxicidad; sin embargo, tiene problemas de transporte y almacenamiento.^[82]
- **Metanol.** Es el principal precursor en la producción de combustibles (DME, gasolina) y de productos químicos de interés (formaldehído, acetato de metil, ácido acético, etileno y propileno). Se produce por la reacción catalítica de monóxido de carbono (y algo de dióxido de carbono) con hidrógeno. La presencia de una cierta cantidad de CO_2 es necesaria para optimizar la reacción. El metanol también puede ser fácilmente deshidratado a éter dimetílico (DME), un producto químico con un buen potencial como combustible para la generación de energía y como mezcla o sustituto de GLP (gas licuado del petróleo) e, incluso, de diésel, debido a sus propiedades: alto número de cetano, mayor punto de ebullición en comparación con el GLP y pocas emisiones de partículas y gases tóxicos,

tales como el Nox en la combustión y presión de vapor similar a la del GLP, por lo que puede ser utilizado en las infraestructuras existentes para el transporte y el almacenamiento.^[83,84]

Del mismo modo, hay cientos de compuestos en el bioaceite que pueden ser extraídos a través de técnicas de separación; otros pueden ser producidos mediante la combinación de la totalidad o parte del aceite con otros compuestos. Sin embargo, la recuperación de cada compuesto puro no es económicamente atractiva, debido a los altos costos de la recuperación de los químicos y a su baja concentración en el bioaceite.

El bioaceite se puede convertir en productos químicos útiles mediante el aprovechamiento de sus grupos funcionales más abundantes: carbonilo, carboxilo y fenólicos. Los productos químicos derivados del bioaceite incluyen resinas, fertilizantes, agroquímicos, adhesivos, levoglucosano, preservativos, hidroxiacetaldehido, ácido acético, saborizantes.^[17,49,50] Además, el bioaceite se ha propuesto como un conservante alternativo de la madera que podría reemplazar compuestos terpenoides y fenólicos, que actúan como insecticidas y fungicidas.^[78] En lo que sigue se hablará de los productos químicos más relevantes. Hay que decir que muchos autores coinciden en algunos usos industriales del bioaceite,^[19,78,85,86] pero es necesario investigar más profundamente en este campo.

- **Saborizantes.** Un sabor a madera o humo líquido se puede extraer del bioaceite; mediante la adición de agua al bioaceite, se puede obtener un producto de color rojo, el cual se rocía sobre la carne antes de cocinarla para crear sabor, color y olor “artificialmente”.
- **Compuestos fenólicos.** La fracción de lignina derivada del bioaceite contiene fenol, eugenol, cresoles, xilenoles y grandes cantidades de (poli)fenoles alquilados (la denominada lignina pirolítica insoluble en agua). Se han reportado recuperaciones de los compuestos fenólicos de hasta 50% en peso, pero solo a partir de materias primas específicas. La cantidad de componentes fenólicos, más pequeños y más caros de bioaceite, es limitada porque la lignina original en la biomasa despolimerizada parcialmente o los monómeros derivados de la lignina son

altamente reactivos en el entorno de pirólisis. En adición, junto con los terpenoides, pueden usarse como un conservante alternativo de la madera para reemplazar la creosota.

- **Resinas.** Resinas y plásticos pueden ser producidos de la lignina oligomérica y del azúcar. Naturalmente, la lignina actúa como un adhesivo para unir las fibras de celulosa, por lo que los compuestos derivados de la lignina pueden ser usados como bioaceite. Las resinas se preparan utilizando la fracción enriquecida con fenoles, obtenida después de la condensación fraccionada y de un procesamiento adicional (como extracción del disolvente), o mediante la utilización de la totalidad del producto líquido.
- **Azúcares.** Producción de anhidro-azúcares como levoglucosano, que tiene potencial para la fabricación de productos farmacéuticos, agentes tensoactivos y polímeros biodegradables, y para la síntesis de antibióticos/feromonas, azúcares raros, butenolida, agentes inmunosupresores, lactonas de *whisky*, entre otros. El levoglucosano (glucosa monodeshidratada) y otros que son ligeramente volátiles se detectan en cantidades de hasta 24% w/w usando comúnmente un análisis por cromatografía de gases (GC).
- **Hidroxiacetaldehído.** Este aldehído está presente en el bioaceite en concentraciones tan altas como 17% w/w. Es una molécula de importancia comercial: se utiliza como agente de dorado para el queso, la carne, los embutidos, las aves y el pescado.^[19] Otra posible aplicación es su uso como precursor para la síntesis de glioxal (OHC-CHO), una importante sustancia química producida por la oxidación de etilenglicol. En general, los aldehídos presentes de forma natural en la fase acuosa son útiles para dorar carne.
- **Sales de calcio.** Las sales de ácidos carboxílicos, producidas por reacción de los ácidos carboxílicos con cal, incluyen acetato de calcio y formiato de calcio. En la fracción acuosa del bioaceite, estos ácidos están presentes normalmente en concentraciones de hasta 3% en peso. Las sales tienen potenciales aplicaciones como descongelantes de carretera o pista de deshielo, captura de SO_x en la combustión de carbón o de combustibles fósiles o como catalizadoras durante la combustión del carbón.

- **Otros productos químicos.** Productos agroquímicos, fertilizantes, ácidos, agentes de control de emisiones y adhesivos (asfalto bioligantes). Los fertilizantes pueden ser producidos por la reacción de carbonilos con amoníaco o por la pulverización de biochar con bioaceite.

4. Influencia de la composición físico-química de la madera

La elección de un proceso de conversión en particular depende principalmente de las propiedades físico-químicas de la madera, de la forma deseada de energía (es decir, los requisitos de uso final), de las normas ambientales y de las condiciones económicas y factores específicos del proyecto.

Primero se debe considerar que ciertas variaciones del proceso de conversión de energía, incluyendo su control y diseño, se encuentran influenciadas por la heterogeneidad de la madera como consecuencia de la variabilidad climática, de las condiciones del suelo, de la edad del árbol e, incluso, de las condiciones de transporte y almacenamiento y de las prácticas de cultivo y recolección.^[87] Por lo anterior, para elegir el proceso de conversión de energía más factible se debe reconocer la composición química de la madera a partir de análisis próximo, último (elemental) y lignocelulósico,^[88] teniendo en cuenta que un alto contenido de humedad favorece los procesos de conversión que involucran reacciones biológicas como la fermentación, mientras que un bajo contenido de humedad favorece la gasificación, pirólisis o combustión. Las propiedades más comunes se mencionan en la **Figura 4-9**.

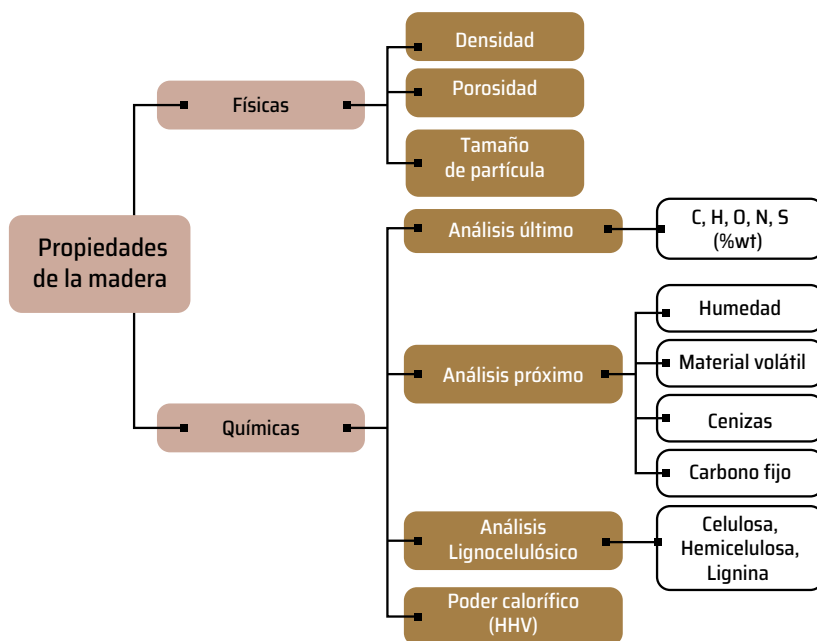


Figura 4-9. Propiedades de la madera que influyen en procesos termoquímicos.

Las propiedades indicadas con anterioridad controlan la forma en que la madera debe ser preparada para su posterior conversión y determinan su aceptabilidad como fuente de energía para el proceso de conversión termoquímica más adaptable.^[89] La calidad de la madera para cualquier proceso de producción es extremadamente importante para un alto rendimiento: tener una madera uniforme puede asegurar una buena calidad del combustible resultante y otros productos químicos. La calidad del material de alimentación está en función de la especie y sistema de producción (recolección, procesamiento y almacenamiento), conectado con las instalaciones de conversión.

Teniendo en cuenta las disposiciones exhibidas, parece ser que una “buena” materia prima debe tener cualidades uniformes y alta densidad. Las cualidades generales incluyen a) estabilidad, uniformidad y reproducibilidad; b) alta densidad energética; c) bajo contenido de humedad; d) bajo contenido de cenizas; e) alta productividad, y f) bajo costo.^[52]

Las partes de la madera vistas en el Capítulo 3 *Generalidades de especies maderables* tienen diferente composición microestructural y química; por ejemplo, la parte interna de la madera tiene un bajo contenido de cenizas en comparación con la corteza (10 veces superior); como resultado, “la corteza no puede ser una excelente fuente de combustible para producir calor y electricidad en un proceso de combustión”.^[90] Por lo tanto, la madera debe ser separada y analizada, con el fin de extraer las partes apropiadas para una aplicación particular. Los pasos de preparación dependen de la materia prima y del tipo de reactor utilizado en la etapa siguiente.

A continuación, se describen los parámetros por estudiar de la madera, previamente a sus fines energéticos. Como se ha dicho, las maderas pueden presentar variabilidad significativa en estas propiedades, por lo que se necesitan métodos estandarizados que permitan estimar las propiedades que se mencionan a continuación cuando hay variación en la materia prima:

Composición química

La madera tiene un gran número de compuestos orgánicos complejos, humedad y pequeñas cantidades de impurezas, conocidas como cenizas. Los compuestos orgánicos comprenden cuatro elementos principales: carbono, hidrógeno, nitrógeno y oxígeno. En el contexto de la conversión térmica, como pirólisis o gasificación, es necesario conocer la composición del combustible, así como su contenido energético, lo que permite escoger el sistema térmico que se va a utilizar, es decir, la tecnología tipo gasificador o combustor.

Análisis último

El análisis último proporciona información sobre la composición elemental de la madera, la cual es muy útil en la determinación de la cantidad de aire necesario para la combustión, el volumen y la composición de los gases de combustión, así como para conocer la temperatura de la llama. Sin embargo, el análisis último no aporta información acerca de la factibilidad de emplear pirólisis, combustión o gasificación, aunque tiene relación directa con los productos obtenidos y con algunos comportamientos del proceso.

- **Carbono, oxígeno e hidrógeno.** El carbono y el oxígeno son oxidados por reacciones exotérmicas, lo que favorece la formación de CO_2 y H_2O , respectivamente.^[91] El dióxido de carbono, CO_2 , es formado y emitido como un producto principal de la combustión completa. El contenido de C y H contribuye positivamente al poder calorífico, mientras que el contenido de O tiene un efecto negativo.

Un alto contenido de H incrementa el rol del combustible H_2 e incrementa la volatilidad y la naturaleza altamente reactiva de la madera;^[22] cuanto mayor es el contenido de hidrógeno de un combustible, menor es la temperatura de vaporización y más alta la probabilidad de que esté en un estado gaseoso.^[17] Por otra parte, se podría pensar que un alto contenido de oxígeno es conveniente porque se requiere menos cantidad de este para la gasificación; sin embargo, la disminución del poder calorífico no favorece los procesos termoquímicos.^[92]

- **Nitrógeno.** Un bajo contenido de nitrógeno, como es característico en las maderas, disminuye las emisiones de NO_x y amoníaco (NH_3), lluvia ácida, contaminación por ozono y problemas de *smog* fotoquímico y de corrosión durante la conversión termoquímica.

Análisis próximo

- **Contenido de humedad (M).** El alto contenido de humedad es una de las características más desventajosas de la utilización de la biomasa como combustible. Un contenido de humedad por encima del 30% wt dificulta la ignición y reduce el poder calorífico de los productos gaseosos debido a la necesidad de evaporar humedad adicional antes de que ocurra la gasificación/combustión.^[93] Además, un alto contenido de humedad genera^[22] problemas durante el pretratamiento y preparación del material (secado, molienda, separación, empaçado, pelletización, torrefacción, otros), reducción de la temperatura de combustión, pobre ignición, aumento del tiempo de residencia en el combustor, problemas de estabilidad de la llama (lo que retrasa la liberación de volátiles y forma una gran cantidad de gas de combustión), craqueo incompleto de los hidrocarburos e incremento de carbono no quemado en las cenizas.

Cabe mencionar, además, que el poder calorífico de un combustible disminuye con el aumento del contenido de humedad, incluso cuando este último se encuentre en el límite máximo aceptable. La presencia de agua en la biomasa influye en su comportamiento durante procesos termoquímicos y afecta las propiedades físicas y la calidad de los productos;^[94] por esto se recomienda que el material se alimente con un contenido de humedad < 10% wt, aun sabiendo que después de la aplicación de un proceso de secado natural al aire, el contenido de humedad de equilibrio todavía se mantendrá por encima de entre 6 y 10% wt, pues depende de la humedad relativa y de la temperatura del ambiente. En cuanto a productos, se ha observado que un aumento en el contenido de humedad incrementa el rendimiento del producto líquido, mientras que disminuye los rendimientos de sólidos y gases.^[95] Esto se debe a que la humedad produce grandes cantidades de agua de condensación en fase líquida.

- **Contenido de cenizas.** La biomasa es más deseable con un bajo contenido de ceniza, logrando una mejor calidad en los productos, debido a que incrementa el poder calorífico y facilita la conversión bioquímica y termoquímica; un alto contenido de ceniza hace imposible la gasificación.^[93] Para un proceso de conversión termoquímica basado en pirólisis, el contenido de ceniza debe ser menor del 1%, lo que refleja el impacto negativo de las cenizas tras la conversión.^[96] Altos contenidos de ceniza pueden causar una serie de problemas en los procesos de conversión bioquímicos y termoquímicos: un mayor desgaste en los sistemas de manipulación y procesamiento, aumento de la corrosividad y de la inestabilidad de los aceites de pirólisis y escoriación e incrustaciones en calderas y gasificadores;^[96] esto, debido a que la temperatura de oxidación es a menudo superior al punto de fusión de la ceniza de biomasa, lo que genera problemas de clinkerización/escoriación en la chimenea y posteriores bloqueos de alimentación. El *clinker* es un problema para los contenidos de ceniza por encima del 5%, especialmente si esta es alta en óxidos alcalinos y sal, lo que produce mezclas eutécticas con bajo punto de fusión.^[93]

La madera, por lo general, contiene cantidades relativamente bajas de ceniza, mientras que los valores significativamente más altos se encuentran típicamente en la corteza, paja, hierbas, granos y residuos de frutas.^[91]

- **Contenido de material volátil (VM).** El contenido de volátiles, o materia volátil (VM), de un combustible sólido es la porción de expulsados en forma de gas (incluida la humedad) en caliente (a 950 °C durante siete minutos).^[4] Un alto contenido de material volátil causa^[22] baja temperatura de ignición; fácil y rápida ignición, desvolatilización y combustión; mayor producción de gas combustible y vapores inorgánicos; oxidación más rápida de VM que char (más combustión con llama, menos combustión de char); mejor combustión, lo que da como resultado un mayor y rápido agotamiento con menor carbono sin quemar en las cenizas, y formación de biochar con mayor área superficial específica.

Como resultado de una gran cantidad de VM, la parte principal de la biomasa se vaporiza antes de que ocurran las reacciones de combustión en fase gaseosa homogénea; el carbón restante se somete, entonces, a reacciones heterogéneas de combustión. Por lo tanto, la cantidad de VM influye fuertemente en la descomposición térmica y comportamiento en la combustión de la biomasa.^[39] Así, altos contenidos de VM favorecen las reacciones de desvolatilización, que ocurren principalmente en un proceso de pirólisis. La madera con alto contenido de VM produce altas cantidades de bioaceite y gas de síntesis.^[95] En otras palabras, un alto contenido de VM favorece los procesos de gasificación indirecta, cuya primera etapa es la desvolatilización de la biomasa para producir gases permanentes, vapores condensables y char, es decir, productos de la pirólisis. Biomosas con bajo contenido de VM son más adecuadas para gasificación (oxidación parcial).^[19,92] También cabe señalar que el contenido de VM es importante porque permite determinar la cantidad de aire de combustión secundario para proporcionar en el interior de la cámara de combustión; el aire primario es el necesario para oxidar el char sólido.

- **Contenido de carbono fijo (FC).** El contenido de carbono fijo (FC) es la masa que queda después de la liberación de compuestos volátiles, excluyendo cenizas y humedad.^[4] Así, FC representa la fracción de combustible que va a someterse a reacciones de combustión heterogénea.

Alto FC indica que el carbón que queda puede ser difícil de encender, pero quemado más lentamente; es decir, alto FC aumenta la producción de biochar.^[95]

También, un alto FC favorece la formación de char (combustión de FC); para procesos de gasificación, la conversión del carbono fijo en gases determina la tasa de gasificación y su rendimiento.^[17] Los volátiles producen alquitranes durante la pirólisis; el carbono fijo produce carbón. Los gasificadores generalmente funcionan mejor con más FC. Un alto contenido de volátiles produce mucho más alquitrán que el necesario para la combustión; por lo tanto, se debe romper el exceso usando maderas con menor contenido de volátiles.

El carbono fijo es poco combustible comparado con el material volátil, el cual quema lentamente. En conclusión, biomasas con alto contenido de material volátil son fáciles de encender con quema rápida, con una llama grande, a menudo mucho humo; biomasas con alto FC son difíciles de encender, y queman lentamente con una llama corta y limpia. La relación de carbono fijo y material volátil (FC/MV) indica la facilidad de ignición, el grado de combustibilidad, teniendo en cuenta que una baja relación significa que la biomasa es un buen combustible debido a su alto contenido de material volátil.

La importancia de los contenidos de material volátil y carbono fijo está en que proporcionan una medida de la facilidad con la que la biomasa puede ser encendida y, posteriormente, gasificada u oxidada, dependiendo de su uso energético final. En general, la biomasa muestra un alto contenido de volátiles y un bajo contenido de carbón fijo en comparación con el carbón, lo que hace que sea un combustible altamente reactivo.

En general, el análisis último está relacionado con el análisis próximo; por ejemplo: un carbón con alto FC contiene mucho carbono, mientras que un carbón con alto contenido de VM contiene mucho hidrógeno.^[97]

- **Poder calorífico (HHV).** El poder calorífico es la cantidad de energía liberada cuando la biomasa está completamente quemada. Esta es una de las propiedades más importantes de la biomasa, por cuanto se refiere a la conversión de energía. En general, las biomasas tienen bajo poder

calorífico debido a su alto contenido de humedad y de oxígeno. Bajos valores de HHV producen bajas temperaturas de llama, lo que no es benéfico para la gasificación.

Propiedades físicas

Dentro de las propiedades físicas de la materia prima están la densidad y el tamaño de partícula.

- **Densidad.** En el contexto de la bioenergía, se pueden definir tres densidades características: real, aparente y de bulto.^[17] La “densidad real” es el peso por unidad de volumen ocupado por el componente sólido de la biomasa. La medición de la densidad real de una biomasa es tan difícil como la medición del verdadero volumen del sólido. Se puede medir con un picnómetro o puede ser estimada utilizando el análisis último y la densidad real de sus elementos constitutivos.

La “densidad aparente” se basa en el volumen aparente o externo de la biomasa. Esto incluye el volumen de los poros internos de una partícula de biomasa, pero no el volumen intersticial entre las partículas de biomasa empaquetadas.^[17] Una alternativa para calcularla es el uso de desplazamiento de volumen en agua. Esta es una característica importante de la biomasa, que influye directamente en el costo de transporte y almacenamiento. La densidad aparente varía con el contenido de humedad y el tamaño de partícula de la biomasa; por lo tanto, en su medida se debe especificar el contenido de humedad y el tamaño-forma de las partículas.^[29]

La “densidad de bulto” está basada en el espacio promedio ocupado por una partícula individual sobre su volumen. Para un grupo de partículas, la densidad de partículas es la masa de todas las partículas dividida entre el volumen de ocupación, incluyendo el volumen intersticial entre las partículas, que depende de cómo se empaqueta la biomasa.^[17,29]

En general, la densidad de partículas de biomasa equivale aproximadamente a la mitad de la del carbón y a alrededor de un quinto de la

densidad aparente.^[93] El menor contenido energético y de densidad aparente de materias primas de biomasa limita la cantidad de biomasa que pueden ser económicamente recogidas, preparadas y transportadas.^[19] La densificación, tal como la fabricación de briquetas y *pellets*, aumenta la densidad aparente, pero también puede alterar la densidad de las partículas (con exclusión de los volúmenes intersticiales de las partículas); al mismo tiempo, otras propiedades tienen notable mejoría, como aumento de densidad energética, resistencia a la degradación biológica, disminución del autoencendido, facilidad de molienda y mejoras en hidrofobicidad, transporte y conversión.^[22]

- **Tamaño de partícula.** Mientras menor es el tamaño de partícula (relacionado con una mayor proporción de área superficial externa/volumen), mejor es la transferencia de calor, puesto que la temperatura será uniforme y dará lugar a reacciones en toda la partícula. Con partículas más pequeñas se logran altas velocidades de transferencia de energía y disminución de la probabilidad de reacciones secundarias gas-sólido que tienden a la formación de gases no condensables; además, se presenta menor resistencia al escape de los gases condensables.^[17,77] Las partículas más grandes, por otra parte, requieren más calor para que las reacciones se den; esto, a su vez, facilita las reacciones secundarias debido a la mayor resistencia que presentan los gases a la fuga.^[99]

Para pirólisis rápida, se recomienda un tamaño de partícula menor de 1 y 2 mm;^[52,77] ahora bien, se presentan especificaciones de tamaño para las tecnologías disponibles;^[100] por ejemplo, para reactores de cono rotatorios, $T_p < 200 \mu\text{m}$; para reactores en lecho fluidizado, $T_p < 2 \text{ mm}$; y para reactores de lecho fluidizado circulante, $T_p < 6 \text{ mm}$. Los reactores ablativos pueden usar chips enteros. En gasificación, el tamaño de partícula también depende del diseño del gasificador: para lecho fijo, el rango de tamaño es de 20 a 80 mm, mientras que para lecho fluidizado es inferior: en el rango de $\sim 1 \text{ mm}$ o menor.^[52]

El tamaño de partícula tiene influencia en los rendimientos de productos; así, partículas grandes incrementan el rendimiento del char, mientras disminuye el rendimiento del bioaceite recuperado; partículas pequeñas conducen a un aumento en los rendimientos de gas, en procesos de gasificación, y de bioaceite, en procesos de pirólisis.^[77,99]

En contraste con lo anterior, la reducción de tamaño implica un gran costo de pretratamiento, por lo que las tecnologías de conversión que tienen dichas exigencias de alimentación son comercialmente poco atractivas.

Análisis lignocelulósico

Por la heterogeneidad de la biomasa, es difícil hacer generalizaciones sobre los sistemas de tratamiento termoquímico y sobre el equipo óptimo. Diferencias químicas en los componentes estructurales de la biomasa (celulosa, hemicelulosa y lignina) tienen un impacto directo en su reactividad química.^[101] La madera con un alto contenido de celulosa y lignina evidencia una mejor estabilidad térmica.

Los componentes individuales se someten a degradación térmica de manera diferente, lo que genera variaciones en las contribuciones a los rendimientos de productos. La celulosa y la hemicelulosa son las principales fuentes de compuestos volátiles en la biomasa lignocelulósica.^[17,101] Por ello, la celulosa es una fuente primaria de vapor condensable, el cual condensa como bioaceite o tar; en la pirólisis de la hemicelulosa, los rendimientos de los gases no condensables son mayores y los rendimientos de tar son menores que los liberados por la celulosa; en la pirólisis de lignina, debido a su contenido en compuestos aromáticos, esta se degrada lentamente, haciendo una importante contribución al rendimiento de biochar.

En la **Figura 4-10** se pueden examinar las contribuciones que hace cada componente de la madera a los productos principales de la pirólisis. Así mismo, en la **Tabla 4-1** se pueden verificar los rendimientos, en porcentaje, obtenidos de cada producto.

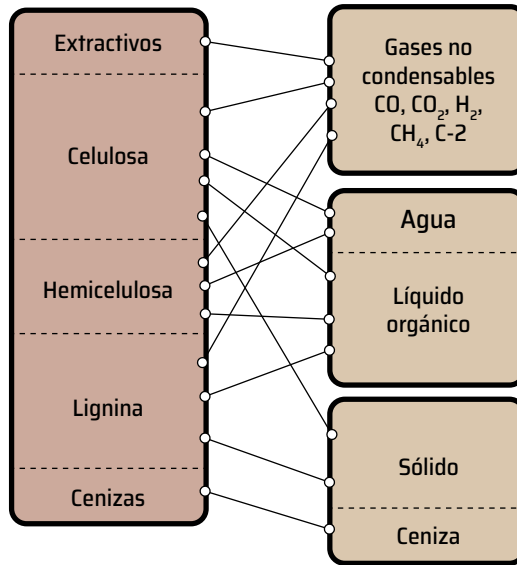


Figura 4-10. Distribución de productos de cada componente de la madera.
Tomada y modificada de^[78]

Tabla 4-1. Rendimiento de productos de los principales componentes en pirólisis.

	Bioaceite	Gas	Char
Celulosa.	81,41	12,15	6,44
Hemicelulosa.	44,22	36,73	19,05
Lignina.	21,77	37,9	40,33

Tomada y modificada de^[102]

Para la biomasa con contenido de celulosa más alto, la tasa de pirólisis es más rápida; mientras que la biomasa con alto contenido de lignina hace que la tasa de pirólisis sea lenta.^[103] Esto es explicado por el hecho de que la celulosa tiene una estructura de cadena lineal de polisacáridos, sin compuestos aromáticos, que se volatiliza fácilmente; a diferencia de la lignina, que se compone de varios grupos funcionales con enlaces de tipo -O- y -C-C característicos de unidades estructurales aromáticas que la hacen más estable térmicamente.^[104]

En adición, un alto contenido de celulosa (más típica de maderas, tallos y fibras herbáceas y agrícolas) y hemicelulosa (más característica de las ramitas de madera, hojas y cortezas, algas y algunas hierbas y granos) puede ser una característica que permita considerar tecnologías de procesamiento factibles, debido a que aumenta la reactividad, hidrofiliidad, hidrólisis, oxidación, volatilidad, cristalinidad, azúcar y materia inorgánica y disminuye el poder calorífico, aromaticidad, densidad y rendimiento del char.^[22]

Por otro lado, el alto contenido de lignina en la biomasa (más típica de cascarrillas agrícolas y ciertas cortezas de madera) lleva a un aumento de poder calorífico, densidad, hidrofobicidad, resistencia mecánica, propiedades aglutinantes, rendimiento del char, aromaticidad, formación de hollín, así como a una mayor resistencia a la degradación natural y a una disminución de la materia inorgánica, oxidación, reactividad, volatilidad y cristalinidad.^[22]

Los extractivos son compuestos de masa molecular inferior en comparación con la celulosa; así que pueden promover la capacidad de encendido de la madera a temperaturas más bajas como resultado de su mayor volatilidad y, por lo tanto, acelerar el proceso de degradación.^[105] De esta manera, la degradación de un componente puede acelerar, a su vez, la degradación de los otros componentes de madera.

Un alto contenido de extractivos tiene ventajas fuertes para producción de biodiésel, bioetanol, biometanol, bioaceite y otros bioquímicos; para la aparición y recuperación potencial y uso de lípidos, proteínas, grasas, aceites, terpenos, taninos, resinas, azúcares, almidones, ácidos orgánicos, sales inorgánicas y otros compuestos orgánicos; para el aumento de proporción de la fracción soluble en agua y la materia inorgánica extraíble; para el aumento de poder calorífico; y para la disminución de la oxidación.^[22]

5. Caracterización de productos con base en su uso final

Los productos obtenidos de los diferentes procesos bioquímicos y termoquímicos deben ser caracterizados con el fin de conocer sus propiedades físicas, químicas y térmicas, de tal suerte que se pueda concluir sobre su comportamiento y características en una aplicación energética específica.

Se deben utilizar estrictos procedimientos de observación y medición para determinar las propiedades de los biocombustibles, con el fin de asegurar su compatibilidad con el motor y garantizar que estén optimizados en términos de rendimiento, eficiencia, durabilidad y regulaciones de emisiones. En la **Tabla 4-2** se describen los análisis físico-químicos que comúnmente se realizan a cada producto.

Tabla 4-2. Principales propiedades de biocombustibles.

Análisis físico-químico	Biochar	Bioaceite	Syngas	Biogás	Biodiésel	Bioetanol
Composición química/elemental.	X	X	X	X	X	X
Contenido de humedad.	X	X	X		X	
Contenido de volátiles, cenizas, metales e impurezas.	X	X	X	X	X	X
Densidad.	X	X		X	X	X
Densidad energética.	X		X	X	X	X
Viscosidad.		X			X	X
pH.	X	X			X	X
Número de cetano/metano/octano.				X	X	X
Propiedades de volatilidad y de ignición.		X	X	X	X	X
Poder calorífico.	X	X	X	X	X	X
Área superficial.	X					
Estructura del poro.	X					

La mayoría de los biocombustibles son bastante heterogéneos con respecto a su composición química elemental, pero coinciden en ser más reactivos que el carbón y tener mayor estabilidad de encendido. Esta característica también hace que sean más fáciles de procesar termoquímicamente en combustibles de mayor valor, tales como metanol e hidrógeno. En diferentes países se han desarrollado estándares de calidad para los diferentes biocombustibles, cuyo objetivo central es garantizar el cumplimiento de todos los valores umbrales ambientales y definir las propiedades relevantes

del producto para su uso en el sector energético; esto le brinda a la industria una herramienta valiosa (reconocida y aceptada del mismo modo por compradores y vendedores) que asegura la calidad y el comportamiento del producto al establecer parámetros claramente definidos. A continuación, se describen las propiedades por evaluar en cada producto de acuerdo con su uso final.

Biochar

El biocarbón es un material heterogéneo rico en carbono aromático y minerales. Es producido por pirólisis lenta de biomasa de forma sostenible en condiciones controladas y se utiliza para cualquier propósito que no implique su rápida mineralización en CO_2 .^[106] Entre los usos actuales y potenciales del biocarbón están mejoras de suelos, remediación de suelos, filtro de agua y suplemento de alimentación animal, además de que puede ser constituyente de fertilizantes; todos estos usos contrastan con opciones alternativas energéticas, entre las que se destaca la combustión para la generación de calor y la cocombustión con carbón en las centrales eléctricas.^[107,108] Con el fin de aprovechar el enorme potencial ambiental del biochar, se necesitan urgentemente normas de calidad y medioambientales según su uso final.

La calidad del biochar es inherente a sus propiedades físicas y químicas, y está influenciada primordialmente, a su vez, por la calidad de la materia prima, que incluye las concentraciones de lignina, celulosa, hemicelulosa y ceniza, y por el proceso de pirólisis y por la temperatura. Se ha sugerido una combinación de propiedades físicas como volumen, distribución de poro, área superficial específica, densidad aparente y capacidad de retención de agua e iones, y propiedades químicas como composición elemental y de cenizas, y contenido de carbono fijo y material volátil como indicadores de calidad del biochar, cuya evaluación depende, en gran medida, de la función del biochar en una aplicación específica.^[86,107]

En este orden de ideas, si el biochar va a ser quemado, el poder calorífico, el punto de inflamación y el contenido de cenizas son factores determinantes de la calidad.^[109] Si el biochar será utilizado como un material de filtro

para eliminar los contaminantes orgánicos o inorgánicos a partir de una corriente de efluente, la capacidad de adsorción y la conductividad hidráulica del biochar serán críticas para el rendimiento.^[109] Si el biochar será utilizado para mejora del suelo, la capacidad de este para retener nutrientes disponibles de las plantas, la capacidad de retención de agua, los rendimientos de los cultivos y el secuestro de carbono son solo algunos de los factores potenciales que influirán en la calidad del biochar.^[109]

En general, la calidad del biochar se puede comprobar mediante la observación física y otras técnicas simples. Los principales criterios son apariencia, tamaño y densidad. La **Tabla 4-3** resume algunas de las propiedades más importantes para caracterizar el biochar. Muchas de ellas se utilizan para definir si el biochar es apropiado para combustión.

Tabla 4-3. Caracterización del biochar.

Propiedades	Valores	
	European Biochar Certificate	IBI Biochar Standards
Contenido de carbono (% masa total, base seca).	> 50%	10%, min.
Relación molar H/corgánico.	0,7	0,7
Relación molar O/C.	0,4, máx.	---
Contenido de agua (wt %).	Declaración. Como biocombustible: < 5	Declaración.
Contenido de material volátil (wt %).	Declaración. Como biocombustible: 10-15	Declaración.
Contenido de cenizas.	Declaración.	50% máx.
Densidad aparente.	100-1.000 g/L	---
pH.	6-10	---
Área superficial específica.	> 150 m ² /g	---
Poder calorífico (kcal/kg).	6.500-7.200	6.500-7.200
Contenido de PAHs [*] .	<i>Basic grade:</i> < 12 mg/kg <i>Premium grade:</i> < 4 mg/kg	6-300 mg/kg
[*] PHAs: Hidrocarburos aromáticos policíclicos.		

Tomada y modificada de^[101,105]

Las materias primas utilizadas para la producción de biochar tienen un impacto directo sobre la naturaleza y la calidad del biochar resultante. Sin importar la materia prima, el biochar se caracteriza por su producción, calidad y uso ambientalmente sostenible. Es de destacar que, además de pirólisis, se puede obtener a partir de otros procesos, como torrefacción, carbonización hidrotérmica y gasificación; esta última puede ser optimizada para la producción de biochar y ser certificada igualmente bajo la EBC.^[106]

Biogás

El contenido energético de biogás está directamente relacionado con la concentración de metano. La composición y propiedades de biogás varían en cierta medida dependiendo de los tipos de materia prima, del sistema de digestión, de la temperatura, del tiempo de retención, etc. Si se considera que el biogás tiene un contenido estándar de metano de 50%, el poder calorífico sería de 21 MJ/Nm³, la densidad de 1,22 kg/Nm³ y su contenido de energía de alrededor de 5,0 kWh/m³;^[55] así, 1 m³ de biogás corresponde a entre 0,5 y 0,6 litros de diésel. Sin embargo, debido a las pérdidas de conversión, 1 m³ de biogás se puede convertir únicamente a alrededor de 1,7 kWh.^[111]

Los parámetros analizados del biogás dependerán del uso final deseado; incluyen motor de combustión interna, microturbina (o sistema de cogeneración) y caldera. En general, el biogás debe cumplir con ciertos requisitos:^[112,113]

- El contenido de metano debe ser tan alto como sea posible, al menos del 95%.
- El vapor de agua y el contenido de CO₂ deben ser tan bajos como sea posible, sobre todo porque conducen a un bajo valor de poder calorífico del gas.
- El contenido de azufre, sobre todo en forma de H₂S, y de otros contaminantes debe ser bajo, ya que estos se convierten en ácidos que causan corrosión y toxicidad por condensación y combustión.

La variación en la calidad del gas natural o del biogás más allá de los límites aceptables puede ser perjudicial para el rendimiento del motor. Una de las

principales preocupaciones en composiciones variables de gas natural en motores alternativos es la detonación (del motor).^[112] La propiedad antide-tonante del gas natural puede ser expresada como número de metano y es análogo al índice de octano de la gasolina. Además de la calidad anti-detonante, el rendimiento operativo de un motor que usa un combustible con un número bajo de metano puede ser importante: un número bajo de metano es generalmente el resultado de la presencia de altos hidrocarburos en el combustible. Otro parámetro importante para los motores de gas es el índice de *Wobbe*, que indica cómo la energía puede suministrarse al quemador, en el caso de un aparato doméstico, o al sistema de combustión, en el caso de un motor de combustión interna; así mismo, permite determinar la relación de potencia y equivalencia, y los cambios que podrían generar bajo rendimiento operacional y ambiental.^[112]

Actualmente hay diferentes normas adoptadas por algunos países europeos (Suiza, Alemania, Suecia, Francia) para el uso de biogás como combustible de transporte; sin embargo, solo Suecia tiene una norma publicada (SS 15 54 38: “*Motor fuels - Biogas as fuel for high-speed otto engines*”).^[113] Basados en la norma anteriormente mencionada, se recomienda que el biogás tenga las especificaciones descritas en la **Tabla 4-4**, principalmente respecto a las impurezas. Por ejemplo, las calderas de fuego directo por lo general no requieren ningún tratamiento; para *CHP* se requiere un tratamiento para biogás altamente contaminado; para el uso en el transporte se debe convertir el biogás a biometano y las tuberías estándares deben ser adaptadas con una etapa final de pulido.^[114]

Tabla 4-4. Propiedades y requerimientos del biogás dependiendo de su utilización.

Propiedades	Unidades	Valor típico
Índice de <i>Wobbe</i> .	MJ/m ³	43,9-47,3
Número de metano.	---	>1 30
Poder calorífico.	MJ/m ³	21-23
Contenido energético.	kWh/Nm ³	9,67

Continúa en la siguiente página.

Continuación de la Tabla 4-4.

Especificaciones	Unidades	Motores	Microturbina	Calderas
Concentración de metano (273 K-101,3 kPa).	%	97 ± 2	> 55	> 50
Contenido de agua.	mg/m ³	32	< 10	< 10
CO ₂ + O ₂ + N ₂ por volumen.	%	< 5		
Sulfuro de hidrógeno, H ₂ S.	ppm	< 250	< 5.000	NE*
Amoniaco (NH ₃).	ppm	< 25	< 200	NE
*No especificado.				

Se ha cuestionado si desde el punto de vista medioambiental, es más apropiado usar el biogás como combustible para el transporte o para producir electricidad a través de *CHP* (*combined heat and power*).^[112] El foco del análisis son las emisiones de CO₂ en el punto de su uso, es decir, las emisiones de escape de los vehículos o de la combustión en la central eléctrica, por lo que no se tienen en cuenta las emisiones del ciclo de vida completo.^[112]

En este orden de ideas, hay ciertas consideraciones para el uso de biogás: en estufas de cocina y calderas industriales; el biogás debe mostrar un contenido de CO₂ y H₂O entre el 25% y el 30% v/v y 6 % v/v, respectivamente, así como un contenido de H₂S inferior a 10 ppm.^[76] Sin embargo, el uso de biogás en la red de gas natural tiene requisitos más exigentes con respecto a los contenidos de CO₂, H₂O y H₂S, que no exceden el 3% v/v, 8% v/v y 15 mg/m³, respectivamente.^[76] Los requisitos antes mencionados para el uso de biogás en la red de gas natural pueden variar de un país a otro.^[76]

Syngas

La composición y calidad del gas de síntesis es altamente dependiente de las entradas al gasificador, así como de la distribución de partículas y formación uniforme del lecho. El gas de síntesis se puede utilizar en motores de gas; sin embargo, como con todos los combustibles de motor, hay límites específicos para los distintos componentes del gas combustible de entrada. La presencia notable de alquitranes, compuestos inorgánicos (metales alcalinos,

nitrógeno, azufre y compuestos de cloro) y partículas sólidas se convierte en un reto técnico clave para la utilización del *syngas*, por cuanto requieren sistemas de limpieza y acondicionamiento para que haya un ajuste al umbral necesario según cada aplicación.^[52] En la **Tabla 4-5** se proporciona información de las especificaciones del *syngas* de acuerdo con su uso.

Tabla 4-5. Especificaciones del *syngas* requeridas para una aplicación final.

Aplicación final	Partículas	Tar	Compuestos sulfurados (H ₂ S, COS)	Compuestos nitrogenados (HCN, NH ₃ +)	Alcalinos (K y N)	Haluros (HCl)
Central eléctrica de vapor.	Requerimiento mínimo.	No importante. Pero debe evitarse la condensación.	Emisiones de Sox Limitado por regulación.	Emisiones de Nox Limitado por regulación.	---	---
Motor de gas.	< 50 mgm ⁻³	< 100 mgm ⁻³	Emisiones de Sox Limitado por regulación.	Emisiones de Nox Limitado por regulación.	---	---
Turbina de gas.	< 30 mgm ⁻³	< 50 mgm ⁻³	< 20 ppmV	< 50 ppmV	< 0,02 ppmV	< 1 ppmV
Síntesis de metanol.	< 0,02 mgm ⁻³	< 0,1 mgm ⁻³	< 1 mgm ⁻³	< 0,1 mgm ⁻³	---	< 0,1 mgm ⁻³
Síntesis Fischer-Tropsch.	ND	< 1 ppmV	< 0,01 ppmV	< 0,02 ppmV	< 0,01 ppmV	< 0,01 ppmV

Tomada y modificada de^[52]

El gas de hidrógeno se quema mucho más rápido que el metano, que es la fuente de energía normal para motores de gas. En circunstancias normales, la combustión más rápida en los cilindros del motor llevaría al potencial de preignición, detonación e ignición prematura del motor. Con el fin de contrarrestar este desafío, el motor tiene una serie de modificaciones técnicas y su potencia se reduce a entre el 50% y el 70% comparado con el gas natural; es decir, un motor de 1.063 kW de gas natural es comparable con un motor de 730 kW de gas sintético.^[115]

En general, gases con un bajo poder calorífico se adaptan mejor en la combustión directa y como combustibles de transporte, mientras que los gases de poder calorífico medio/alto pueden ser utilizados en la síntesis de productos químicos, principalmente metano y metanol.^[93,116]

Bioaceite

El bioaceite posee una amplia gama de propiedades debido a la naturaleza compleja de su constitución; estas le atribuyen un inusual comportamiento desde el punto de vista físico-químico. La caracterización del bioaceite es el punto de partida para la estandarización de su calidad y del proceso productivo, con fines investigativos o comerciales, con el objetivo de promover su aceptación como combustible.^[77,117] Por ello, es fundamental conocer detalladamente las implicaciones que estas propiedades tienen sobre la cadena productiva y sobre su posterior uso. Las propiedades típicas de un bioaceite obtenido de la pirólisis de madera se describen en la **Tabla 4-6**.

Tabla 4-6. Propiedades típicas de bioaceite derivado de madera.

Propiedades	Valor típico
Contenido de humedad.	15-30%
pH.	2,5
Gravedad específica.	1,2
Composición elemental.	C 55-58% H 5,5-7,0% 35-40% N < 0,1% S < 0,02% Ash < 0,02%
Poder calorífico superior (MJ/kg).	16-19
Viscosidad (40 °C y 25% de agua).	40-100 m ² s ⁻¹
Densidad a 15 °C (kg/L).	1,2
Punto de inflamabilidad (°C).	48-55
Punto de fluidez (°C).	-15
Sólidos (char).	0,1-1,0%
Residuos de destilación (% w/w).	> 50

Tomada y modificada de^[48]

Es posible encontrar una gran variedad de caracterizaciones de bioaceites, obtenidos de diferentes materias primas, por lo que no hay garantía de estandarización del producto final obtenido, ya que las características físico-químicas de la biomasa alimentada influyen en la naturaleza del producto final, así como la especie, edad y parte de la planta seleccionada para ser termoquímicamente transformada.^[77,117] No obstante, el factor común de los bioaceites es el contenido de una gran cantidad de especies reactivas que les dan atributos y comportamientos peculiares: se incluyen gualcoles, catecoles, siringoles, vanilinas, furacarboxialdehidos, isoeugenol, pironas, ácido acético, ácido fórmico, entre otros ácidos.^[52,77] A diferencia de los combustibles derivados del petróleo, el bioaceite tiene un gran contenido de oxígeno, por lo general del 45 al 55% w/w, lo que lo hace poco estable y le confiere diferencias en las propiedades y el comportamiento como consecuencia de la naturaleza polar causada por la presencia de grupos funcionales oxigenados.^[86,118]

Las especificaciones de calidad del bioaceite, para ser utilizado en diversos tipos de equipos que queman combustibles bajo diversas condiciones climáticas y de operación, han sido establecidas por la Norma ASTM D-7544 y por normas similares en sus respectivos países. Estas especificaciones se incluyen en la **Tabla 4-7**.

Tabla 4-7. Requerimientos detallados por la Norma ASTM D7544 para uso de bioaceite en quemadores.

Propiedades	Valor típico
Calor bruto de combustión, min. (MJ/kg)	15
Contenido de humedad, máx.	30%
pH.	Report.
Densidad a 20 °C (kg/dm ³).	1,1-1,3
Viscosidad cinemática, máx. (40 °C).	125
Sólidos, máx. (% masa).	0,25-2,5 %
Contenido de sulfuro (% masa).	0,05
Contenido de cenizas (% masa).	0,15-0,25
Punto de inflamabilidad, min. (°C).	45
Punto de fluidez (°C).	-9

Tomada y modificada de^[119]

Biodiésel

La calidad del biodiésel puede estar influenciada por varios factores: calidad de la materia prima, composición de ácidos grasos del aceite vegetal o grasa animal, proceso de producción y los materiales utilizados en este proceso, parámetros de postproducción, almacenamiento o transporte.^[66] Debido a que la mayoría de los motores diésel actuales están diseñados para ser alimentados por combustible diésel, las propiedades físico-químicas del biodiésel deben ser similares a las del aceite diésel.^[66] A continuación se presentan las principales normas sobre la calidad del biodiésel comercial adoptado en diferentes regiones del mundo (**Tabla 4-8**). Antes, vale anotar que en Estados Unidos, el biodiésel debe tener propiedades acordes con la ASTM D6751, mientras en Europa se aplica la EN 14214.

Tabla 4-8. Especificaciones del biodiésel bajo las normas ASTM D6751 y EN 14214.

Propiedades	Valor típico	
	ASTM D6751-12	EN 14214:2012
Contenido de éster (% m/m).	---	96,5 min.
Agua y sedimentos, máx. (% vol./vol.).	0,05	----
Contenido de agua, máx. (mg/kg).	500	500
Contenido de azufre, máx. (mg/kg).	0,05	10
Contenido de metanol, máx. (% m/m).	0,2	0,2
Total contaminantes, máx. (mg/kg).	24	24
Monoglicéridos (% m/m).		0,8
Diglicéridos (% m/m).		0,2
Triglicéridos (% m/m).	0,02	0,2
Glicerina libre (% m/m).		0,02
Índice de acidez, máx. (mg KOH/g).	0,5	0,5
Índice de lodo, máx. (GL/100 g).	---	120
Densidad a 15 °C (kg/m ³).	---	860-900

Propiedades	Valor típico	
	ASTM D6751-12	EN 14214:2012
Viscosidad a 40°C (mm ² /s).	1,9-6,0	3,5-5,0
Punto de inflamación, min. (°C).	93	> 101
Número de cetano, min.	47	51
Residuo de carbono, 10% residuo dist. (% m/m).	0,05	0,3
Estabilidad oxidativa, 110°C (horas), min.	3	6

Tomada y modificada de^[120,121]

Algunas propiedades son reguladas (número de cetano, estabilidad a la oxidación, densidad, viscosidad, propiedades a bajas temperaturas, punto de inflamación, contenido de agua, etc.) y otras no (composición elemental, composición de éster metílico y etílico de ácidos grasos, poder calorífico, lubricidad, etc.).

El combustible biodiésel tiene propiedades químicas muy similares a las del diésel convencional y no requiere ninguna modificación del motor o equipo nuevo para permitir su uso como una mezcla o sustituto del diésel convencional.^[66] Las normas de calidad para el biodiésel se actualizan continuamente por la evolución de los motores de encendido por compresión, por las normas de emisiones cada vez más estrictas y por la reevaluación de la elegibilidad de las materias primas utilizadas para la producción (de biodiésel), etc.^[121] Sin embargo, debido a que las propiedades físico-químicas del biodiésel están fuertemente influenciadas por la naturaleza y la composición de las materias primas utilizadas en su producción, los requisitos de calidad para su comercialización varían de una región a otra; hay que tener en cuenta que se hallan mayores diferencias en el número de cetano, estabilidad a la oxidación, índice de yodo, densidad y viscosidad. Por lo tanto, la unificación de las normas referidas al biodiésel no es posible, y esta imposibilidad se convierte en un impedimento grave para las importaciones y exportaciones, y, por otro lado, para los fabricantes de automóviles, que deben adaptar sus motores a la calidad de la región donde se utilizarán los vehículos.^[121]

Bioetanol

El uso de etanol como combustible para el transporte ha estado creciendo en los últimos años. Paralelo a este desarrollo, también la necesidad de especificaciones y normas locales y mundiales. Como consecuencia del carácter higroscópico del etanol, su contenido de agua desnaturalizado debe ser limitado cuando se mezcla con gasolina, con el fin de reducir el riesgo de separación de fases.^[122,123] Típicamente, el etanol anhidro se mezcla con gasolina, en una proporción de 5% v/v (Unión Europea) y 10% v/v (Estados Unidos) para su uso en motores convencionales sin modificación y sin generar incompatibilidades con materiales y equipos.^[64,123] Cuando el etanol se mezcla en el combustible a niveles superiores a 10% en volumen, son necesarias algunas modificaciones en el motor.^[124]

Los estándares de calidad del etanol mezclado con gasolina han sido establecidos en varios países: las normas ASTM D4806 y D5798, desarrolladas en Estados Unidos. La D4806 cubre etanol anhidro desnaturalizado, destinado a ser mezclado con gasolina, con plomo o sin plomo, en porcentajes volumétricos de 1 a 10 para su uso en motores de combustión de encendido de chispa.^[123,125] La D5798 fue publicada para regular la calidad de E85, una mezcla específica de entre 75% y 85% v/v de etanol y 25% y 25% v/v de hidrocarburos.^[125] En Europa, la norma estándar EN 15376 fue establecida para uso de etanol como componente de la mezcla con gasolina hasta 5% v/v (**Tabla 4-9**).

Tabla 4-9. Especificaciones del etanol bajo las normas ASTM D4806-D5798 y EN 13576.

Propiedades	Valor típico		
	ASTM D4806	ASTM D5798-11	EN 15376
Contenido de etanol, min. (% vol.)	92,1	70-79	98,7% m/m'
Contenido de metanol, máx. (% vol.)	0,5	0,5	1,0% m/m
pH.	6,5-9,0	6,5-9,0	6,5-9,0 ---
Presión de vapor (kPa).		38-83	

Continúa en la siguiente página.

Continuación de la Tabla 4-9.

Propiedades	Valor típico		
	ASTM D4806	ASTM D5798-11	EN 15376
Contenido de alcohol monosaturado (C3-C5) (% m/m).	---	2,0	2,0
Contenido de hidrocarburos (% vol.).	---	17-30	---
Contenido de agua, máx. (% vol.).	1,0	1,0	0,3% m/m
Contenido desnaturalante, (% vol.).	1,96-2,5	5	---
Contenido de cloruro inorgánico, máx. (ppmw).	10	1	20 mg/L
Contenido de cobre, máx.	0,1 ppmw	0,07 mg/L	0,1 ppmw
Contenido de azufre, máx. (ppmw).	30	80	10
Contenido de sulfato, máx. (ppmw).	4	---	---
Contenido de fósforo, máx. (ppm).	---	0,2-0,4	0,50
Contenido de material no volátil, máx. (mg/100 ml).	---	---	10
Acidez como ácido acético, máx. (% masa).	0,007	0,005	0,007
Apariencia. El producto deberá estar visiblemente libre de contaminantes suspendidos o precipitados (deberá ser claro y brillante).			
*Se incluye el contenido de alcoholes altamente saturados.			

Tomada y modificada de^[123,124]

La intención primordial al usar el etanol en mezclas con gasolina es mejorar sus propiedades físico-químicas. Por destacar, el etanol tiene un índice de octano de 108,6, el cual se puede incrementar si se mezcla aproximadamente 10% de etanol con gasolina^[123] de manera que se convierta en un combustible preferido para motores de combustión interna de encendido por chispa (ICEs) por funcionar a una alta relación de compresión, lo que

genera más potencia.^[38,66] Además, se desea mejorar la densidad de energía del etanol (puesto que 1 kg de etanol tiene alrededor del 66% de la energía que tiene 1 kg de gasolina; esto se traduce en menos millas por galón cuando el etanol es sustituido por la gasolina en los automóviles)^[123] y otras propiedades desventajosas suyas como la corrosividad, la baja luminosidad de la llama, la baja presión de vapor, y la toxicidad y emisiones, que llevan a menores eficiencias en los ICEs.^[38,123,124]

Referencias bibliográficas

1. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), “What woodfuels can do to mitigate climate change”, FAO Forestry Paper, Roma, p. 84, 2010.
2. O. Ellabban, H. Abu-Rub y F. Blaabjerg, “Renewable energy resources: current status, future prospects and their enabling technology”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 39, pp. 748-764, 2014.
3. J. Twidell y T. Weir, “Renewable energy resources”, tercera edición, 2015.
4. P. McKendry, “Energy production from biomass (part 1): overview of biomass”, *Bioresour. Technol.*, vol. 83, n.º 1, pp. 37-46, 2002.
5. R. C. Saxena, D. K. Adhikari y H. B. Goyal, “Biomass-based energy fuel through biochemical routes: a review”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, n.º 1, pp. 167-178, 2009.
6. L. Zhang, C. Charles y P. Champagne, “Overview of recent advances in thermo-chemical conversion of biomass”, *Energy Convers. Manag.*, vol. 51, n.º 5, pp. 969-982, 2010.
7. W. H. Chen, J. Peng y X. T. Bi, “A state-of-the-art review of biomass torrefaction, densification and applications”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 44, pp. 847-866, 2015.
8. J. Y. Zhu, X. Pan y R. S. Zalesny, “Pretreatment of woody biomass for biofuel production: energy efficiency, technologies, and recalcitrance”, *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, vol. 87, n.º 3, pp. 847-857, 2010.
9. A. Limayem y S. C. Ricke, “Lignocellulosic biomass for bioethanol production: current perspectives, potential issues and future prospects”, *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 38, n.º 4, pp. 449-467, 2012.
10. H. L. Chum y R. P. Overend, “Biomass and renewable fuels”, *Fuel Process. Technol.*, vol. 71, n.º 1-3, pp. 187-195, 2001.

11. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), “Wood energy”, 2016. [En línea]. Disponible: <http://www.fao.org/forestry/energy/en/>. [Accedido: 19-Sep-2016].
12. P. Karinkanta, A. Ämmälä, M. Illikainen y J. Niinimäki, “Fine grinding of wood- Overview from wood breakage to applications”, *Biomass and Bioenergy*, vol. 113, n.º marzo, pp. 31-44, 2018.
13. L. Tabil, P. Adapa y M. Kashaninejad, “Biomass feedstock pre-processing-part 2: densification”, *Biofuel’s Engineering Process Technology*, InTech Published, pp. 439-464, 2011.
14. J. S. Tumuluru, S. Sokhansanj, J. R. Hess, *et al.* “A review on biomass torrefaction process and product properties for energy applications”, *Ind. Biotechnol.*, vol. 7, pp. 384-401, 2011.
15. P. McKendry, “Energy production from biomass (part 2): conversion technologies”, *Bioresour. Technol.*, vol. 83, n.º 1, pp. 47-54, 2002.
16. J. J. Chew y V. Doshi, “Recent advances in biomass pretreatment-Torrefaction fundamentals and technology”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, n.º 8, pp. 4212-4222, 2011.
17. P. Basu, “Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction: practical design and theory”, segunda edición, Elsevier Inc, 2013.
18. P. Tanger, J. L. Field, C. E. Jahn, *et al.* “Biomass for thermochemical conversion: targets and challenges”, *Front. Plant Sci.*, vol. 4, n.º julio, pp. 1-20, 2013.
19. R. C. Brown, “Thermochemical processing of biomass: conversion into fuels, chemicals and power”, primera edición, Chichester, Reino Unido: John Wiley & Sons, Ltd., 2011.
20. V. Dhyani y T. Bhaskar, “A comprehensive review on the pyrolysis of lignocellulosic biomass”, *Renew. Energy*, 2017.
21. S. Nishiguchi y T. Tabata, “Assessment of social, economic, and environmental aspects of woody biomass energy utilization: direct burning and wood *pellets*”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 57, pp. 1279-1286, 2016.
22. S. V. Vassilev, C. G. Vassileva y V. S. Vassilev, “Advantages and disadvantages of composition and properties of biomass in comparison with coal: an overview”, *Fuel*, vol. 158, pp. 330-350, 2015.
23. M. J. C. Van der Stelt, H. Gerhauser, J. H. A. H. Kiel y K. J. J. Ptasiński, “Biomass upgrading by torrefaction for the production of biofuels: a review”, *Biomass and Bioenergy*, vol. 35, n.º 9, pp. 3748-3762, 2011.

24. W. H. Chen, "Torrefaction", *Pretreatment of Biomass Processes and Technologies*, Taiwan: Elsevier B. V., pp. 173-192, 2015.
25. C. F. Valdés, F. Chejne, G. P. Marrugo, C. A. Gómez, A. Marín-Jaramillo y L. Norena-Marín, "Energy evaluation of pelletized mixtures of IWTP sludge and coal-fired boiler ashes by co-combustion: Identification of synergistic effects", *Appl. Therm. Eng.*, vol. 124, pp. 191-201, 2017.
26. J. S. Tumuluru, C. T. Wright, J. R. Hess y K. L. Kenney, "A review of biomass densification systems to develop uniform feedstock commodities for bioenergy application", *Biofuels, Bioprod. Biorefining*, vol. 5, n.º 3, pp. 683-707, 2011.
27. W. G. Hubbard, "Wood bioenergy", *Bioenergy: Biomass to Biofuels*, A. Dahiya, Ed. Elsevier Inc., pp. 55-70, 2015.
28. P. S. Lam, Z. Tooyserkani, L. J. Naimi y S. Sokhansanj, "Pretreatment and pelletization of woody biomass", *Pretreatment Techniques for Biofuels and Biorefineries*, pp. 93116, 2013.
29. D. K. Lee, A. S. Parrish y T. B. Voigt, "Engineering and science of biomass feedstock production and provision", primera edición, Springer Science & Business Media, 2014.
30. D. A. Granados, R. A. Ruiz, L. Y. Vega y F. Chejne, "Study of reactivity reduction in sugarcane bagasse as consequence of a torrefaction process", *Energy*, vol. 139, pp. 818-827, 2017.
31. S. Gent, M. Twedt, C. Gerometta y E. Almberg, "Theoretical and applied aspects of biomass torrefaction: for biofuels and value-added products", 2017.
32. P. Bergman, A. Boersma, R. Zwart y J. Kiel, "Torrefaction for biomass co-firing in existing coal-fired power stations", *Energy Res. Cent. Netherlands ECN ECNC05013*, vol. b, n.º julio, p. 71, 2005.
33. W. H. Chen, H. C. Hsu, K. M. Lu, W. J. Lee y T. C. Lin, "Thermal pretreatment of wood (Lauan) block by torrefaction and its influence on the properties of the biomass", *Energy*, vol. 36, pp. 3012-3021, 2011.
34. S. Gent, M. Twedt, C. Gerometta y E. Almberg, "Theoretical and applied aspects of biomass torrefaction: for biofuels and value-added products. Butterworth-Heinemann", 2017.
35. A. Uslu, A. P. Faaij y P. C. A. Bergman, "Pre-treatment technologies, and their effect on international bioenergy supply chain logistics. Techno-economic evaluation of torrefaction, fast pyrolysis and pelletisation", *Energy*, vol. 33, pp. 1206-1223, 2008.
36. B. Batidzirai, a. P. R. Mignot, W. B. Schakel, *et al.* "Biomass torrefaction technology: techno-economic status and future prospects", *Energy*, vol. 62, pp. 196-214, 2013.
37. A. Kan, "General characteristics of waste management: a review", *Energy Educ. Sci. Technol.*, vol. 23, n.º 1, pp. 55-69, 2009.

38. A. Demirbas, "Biorefineries for Biomass Upgrading Facilities. Springer Science & Business Media", 2010.
39. S. Van Loo y J. Koppejan, "The handbook of biomass combustion and co-firing", Earthscan, 2008.
40. E. Dahlquist, "Technologies for converting biomass to useful energy, combustion, gasification, pyrolysis, torrefaction and fermentation", Taylor & Francis Group, 2013.
41. H. Cser y L. Boby, "Technologies that produce electricity, heat, and fuel from biomass feedstocks", Integrated Biomass Supply Systems, pp. 1-4, 2015.
42. K. Rehman Hakeem, M. Jawaid y U. Rashid, "Biomass and bioenergy applications", Springer International Publishing, 2014.
43. Z. Yuan y M. R. Eden, "Recent advances in optimal design of thermochemical conversion of biomass to chemicals and liquid fuels", Curr. Opin. Chem. Eng., vol. 10, pp. 70-76, 2015.
44. M. Balat, M. Balat, E. Kirtay y H. Balat, "Main routes for the thermo-conversion of biomass into fuels and chemicals. Part 2: gasification systems", Energy Convers. Manag., vol. 50, n.º 12, pp. 3147-3157, 2009.
45. H. Boerrigter y R. Rauch, "Review of applications of gases from biomass gasification", ECN Biomass, Coal Environ. Res., p. 33, 2006.
46. E. Kantarelis, W. Yang y W. Blasiak, "Biomass pyrolysis for energy and fuel production", Technologies for converting biomass to useful energy-combustion, gasification, pyrolysis, torrefaction and fermentation, pp. 245-271, 2013.
47. Q. Lu, W. Z. Li y X. F. Zhu, "Overview of fuel properties of biomass fast pyrolysis oils", Energy Convers. Manag., vol. 50, pp. 1376-1383, 2009.
48. A. V. Bridgwater, "Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading", Biomass and Bioenergy, vol. 38, pp. 68-94, 2012.
49. B. Pecha y M. García-Pérez, "Pyrolysis of lignocellulosic biomass: oil, char, and gas", Bioenergy, Anju Dahiya, pp. 413-442, 2015.
50. T. Murray, D. F. Resende y G. Luo, "Bio-Oil: an introductions to fast pyrolysis and its applications", Washington State University, pp. 1-8, 2014.
51. E. Dahlquist, "Technologies for converting biomass to useful energy: combustion, gasification, pyrolysis, torrefaction and fermentation", CRC Press, 2013.
52. A. Pandey, T. Bhaskar, M. Stöcker y R. K. Sukumaran, "Recent advances in thermo-chemical conversion of biomass", Elsevier B. V., 2015.

53. C. I. A. Ferreira, V. Calisto, E. M. Cuerda-Correa, *et al.* “Comparative valorisation of agricultural and industrial biowastes by combustion and pyrolysis”, *Bioresour. Technol.*, vol. 218, pp. 918-925, 2016.
54. Y. Zheng, J. Zhao, F. Xu y Y. Li, “Pretreatment of lignocellulosic biomass for enhanced biogas production”, *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 42, pp. 35-53, 2014.
55. T. Al Seadi, D. Rutz, H. Prassl, *et al.* “Biogas handbook”, Denmark: University of Southern Denmark Esbjerg, 2008.
56. D. Kumari y R. Singh, “Pretreatment of lignocellulosic wastes for biofuel production: a critical review”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 90, n.º mayo, pp. 877-891, 2018.
57. N. Mosier, C. Wyman, B. Dale, *et al.* “Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass”, *Bioresour. Technol.*, vol. 96, pp. 673-686, 2005.
58. J. Y. Zhu y X. J. Pan, “Woody biomass pretreatment for cellulosic ethanol production: technology and energy consumption evaluation”, *Bioresour. Technol.*, vol. 101, pp. 4992-5002, 2010.
59. S. Haghghi Mood, A. Hossein Golfeshan, M. Tabatabaei, *et al.* “Lignocellulosic biomass to bioethanol, a comprehensive review with a focus on pretreatment”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 27, pp. 77-93, 2013.
60. A. T. W. Hendriks y G. Zeeman, “Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass”, *Bioresour. Technol.*, vol. 100, pp. 10-18, 2009.
61. M. Saritha, A. Arora y Lata, “Biological pretreatment of lignocellulosic substrates for enhanced delignification and enzymatic digestibility”, *Indian J. Microbiol.*, vol. 52, n.º 2, pp. 122-130, 2012.
62. S. Yesmin, J. Lee, G. Kim, *et al.* “Bioethanol production using lignocellulosic biomass-review”, *J. Korea TAPPI*, vol. 42, n.º 5, pp. 1-14, 2010.
63. L. Wei, L. O. Pordesimo, C. Igathinathane y W. D. Batchelor, “Process engineering evaluation of ethanol production from wood through bioprocessing and chemical catalysis”, *Biomass and Bioenergy*, vol. 33, n.º 2, pp. 255-266, 2009.
64. M. Balat, “Production of bioethanol from lignocellulosic materials via the biochemical pathway: a review”, *Energy Convers. Manag.*, vol. 52, n.º 2, pp. 858-875, 2011.
65. Y. R. Shah y D. J. Sen, “Bioalcohol as green energy-a review”, *Int. J. Curr. Sci. Res.*, vol. 1, n.º 2, pp. 57-62, 2011.
66. R. Arumugam, “Alternative fuels for transportation”, vol. 53, n.º 9, Taylor & Francis Ltd, 2011.
67. J. M. Marchetti, V. U. Miguel y F. Errazu, “Possible methods for biodiesel production”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 11, pp. 1300-1311, 2007.

68. J. Clark y F. Deswarte, "Introduction to chemicals from biomass", segunda edición, Reino Unido: Wiley, 2015.
69. P. S. Nigam y A. Singh, "Production of liquid biofuels from renewable resources", *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 37, pp. 52-68, 2011.
70. P. Verma y M. P. Sharma, "Review of process parameters for biodiesel production from different feedstocks", *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 62, pp. 1063-1071, 2016.
71. L. Sa Yong, M. A. Hube y S. Saka, "Prospects for biodiesel as a byproduct of wood pulping-a review", *BioResources*, vol. 1, n.º 1, pp. 150-171, 2006.
72. A. Yousuf, "Biodiesel from lignocellulosic biomass-Prospects and challenges", *Waste Manag.*, vol. 32, n.º 11, pp. 2061-2067, 2012.
73. N. Carels, "The challenge of bioenergies: an overview", *Biofuel's Engineering Process Technology*, Marco Aurelio Dos Santos Bernardes, Ed. InTech, 2011.
74. W. Hubbard, L. Biles, C. Mayfield y S. Ashton, "Sustainable forestry for bioenergy and bio-based products: trainers curriculum notebook", p. 316, 2007.
75. V. S. Sikarwar, M. Zhao, P. Clough, *et al.* "An overview of advances in biomass gasification", *Energy Environ. Sci.*, vol. 9, n.º 10, pp. 2939-2977, 2016.
76. J. C. Solarte-Toro, Y. Chacón-Pérez y C. A. Cardona-Alzate, "Evaluation of biogas and *syngas* as energy vectors for heat and power generation using lignocellulosic biomass as raw material", *Electron. J. Biotechnol.*, vol. 33, pp. 52-62, 2018.
77. J. I. Montoya, F. Chejne, E. F. Castillo, *et al.* "Pirólisis rápida de biomasa", primera edición, Medellín: Universidad Nacional de Colombia, 2014.
78. S. Czernik y A. V. Bridgwater, "Overview of applications of biomass fast pyrolysis oil", *Energy & Fuels*, vol. 18, pp. 590-598, 2004.
79. N. L. Panwar, S. C. Kaushik y S. Kothari, "Role of renewable energy sources in environmental protection: a review", *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, n.º 3, pp. 1513-1524, 2011.
80. V. Menon y M. Rao, "Trends in bioconversion of lignocellulose: biofuels, platform chemicals & biorefinery concept", *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 38, pp. 522-550, 2012.
81. F. Cherubini, "The biorefinery concept: using biomass instead of oil for producing energy and chemicals", *Energy Convers. Manag.*, vol. 51, pp. 1412-1421, 2010.
82. H. Balat y E. Kirtay, "Hydrogen from biomass-Present scenario and future prospects", *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 35, pp. 7416-7426, 2010.
83. R. Vakili, E. Pourazadi, P. Setoodeh, *et al.* "Direct dimethyl ether (DME) synthesis through a thermally coupled heat exchanger reactor", *Appl. Energy*, vol. 88, pp. 1211-1223, 2011.

84. Z. Azizi, M. Rezaeimanesh, T. Tohidian and M. R. Rahimpour, “Dimethyl ether: a review of technologies and production challenges”, *Chem. Eng. Process. Process Intensif.*, vol. 82, pp. 150-172, 2014.
85. S. Xiu y A. Shahbazi, “Bio-oil production and upgrading research: a review”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, pp. 4406-4414, 2012.
86. M. García-Pérez, J. García-Núñez, T. Lewis, C. Kruger y S. Kantor, “Methods for producing biochar and advanced biofuels in Washington State. Part 3: literature review of technologies for product collection and refining”, n.º Third Project Report. p. 129, 2011.
87. S. V. Vassilev, D. Baxter, L. K. Andersen y C. G. Vassileva, “An overview of the chemical composition of biomass”, *Fuel*, vol. 89, n.º 5, pp. 913-933, 2010.
88. A. P. Samal, S. K. Patel y M. Kumar, “Characterization of properties and estimation of power generation potentials of some woody biomass residues”, *Energy Sources, Part a Recover. Util. Environ. Eff.*, vol. 38, n.º 12, pp. 1819-1824, 2016.
89. J. Cai, Y. He, X. Yu, S. W. Banks, *et al.* “Review of physicochemical properties and analytical characterization of lignocellulosic biomass”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 76, n.º enero, pp. 309-322, 2017.
90. P. S. Lam y S. Sokhansanj, “Engineering properties of biomass”, *Engineering and Science of Biomass Feedstock Production and Provision*, pp. 17-34, 2014.
91. I. Obernberger, T. Brunner y G. Bänthaler, “Chemical properties of solid biofuels-significance and impact”, *Biomass and Bioenergy*, vol. 30, n.º 11, pp. 973-982, 2006.
92. K. J. Ptasinski, “Efficiency of biomass energy: an exergy approach to biofuels, power, and biorefineries”, Wiley, 2016.
93. P. McKendry, “Energy production from biomass (part 3): gasification technologies”, *Bioresour. Technol.*, vol. 83, n.º 1, pp. 55-63, 2002.
94. A. Demirbas, “Potential applications of renewable energy sources, biomass combustion problems in boiler power systems and combustion related environmental issues”, *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 31, n.º 2, pp. 171-192, 2005.
95. M. I. Jahirul, M. G. Rasul, A. A. Chowdhury y N. Ashwath, “Biofuels production through biomass pyrolysis-A technological review”, *Energies*, vol. 5, n.º 12, pp. 4952-5001, 2012.
96. K. L. Kenney, W. A. Smith, G. L. Gresham y T. L. Westover, “Understanding biomass feedstock variability”, *Biofuels*, vol. 4, n.º 1, pp. 111-127, 2013.
97. H. Masuda, K. Higashitani y H. Yoshida, “Powder technology handbook”, CRC Press, 2006.
98. L. Baxter, “Biomass-coal co-combustion: opportunity for affordable renewable energy”, *Fuel*, vol. 84, n.º 10, pp. 1295-1302, 2005.

99. J. J. Hernández, G. Aranda-Almansa y A. Bula, “Gasification of biomass wastes in an entrained flow gasifier: effect of the particle size and the residence time”, *Fuel Process. Technol.*, vol. 91, n.º 6, pp. 681-692, 2010.
100. A. V. Bridgwater y G. V. C. Peacocke, “Fast pyrolysis processes for biomass”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 4, n.º 1, pp. 1-73, 2000.
101. A. García-Maraver, D. Salvachúa, *et al.* “Analysis of the relation between the cellulose, hemicellulose and lignin content and the thermal behavior of residual biomass from olive trees”, *Waste Manag.*, vol. 33, n.º 11, pp. 2245-2249, 2013.
102. S. Wang, X. Guo, K. Wang y Z. Luo, “Influence of the interaction of components on the pyrolysis behavior of biomass”, *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 91, n.º 1, pp. 183-189, 2011.
103. A. Gani y I. Naruse, “Effect of cellulose and lignin content on pyrolysis and combustion characteristics for several types of biomass”, *Renew. Energy*, vol. 32, n.º 4, pp. 649-661, 2007.
104. G. Marrugo, “Efecto de los cambios estructurales de diferentes biomásas pirolizadas sobre las características del gas de síntesis, obtenido a partir de la gasificación de biochar”, Universidad Nacional de Colombia, 2015.
105. M. Poletto, A. J. Zattera, M. M. C. Forte y R. M. C. Santana, “Thermal decomposition of wood: influence of wood components and cellulose crystallite size”, *Bioresour. Technol.*, vol. 109, pp. 148-153, 2012.
106. European Biochar Foundation (EBC), “Guidelines for a sustainable production of biochar,” European Biochar Foundation (EBC), Arbaz, Switzerland, pp. 1-22, 2016.
107. S. P. Sohi, E. Krull, E. López-Capel y R. Bol, “A review of biochar and its use and function in soil”, *Advances in Agronomy*, vol. 105, n.º 1, 2010, pp. 47-82.
108. D. A. Laird, R. C. Brown, J. E. Amonette y J. Lehmann, “Review of the pyrolysis platform for coproducing bio-oil and biochar”, *Biofuels, Bioprod. Biorefining*, vol. 3, n.º 5, pp. 547-562, 2009.
109. D. Laird, N. Rogovska, M. García-Pérez, *et al.* “Pyrolysis and Biochar-Opportunities for distributed production and soil quality enhancement”, sustainable alternative fuel feedstock opportunities, challenges and roadmaps for six U. S. Regions, Atlanta, pp. 257-281, 2010.
110. International Biochar Initiative (IBI), “Standardized product definition and product testing guidelines for biochar that is used in soil”, 2015.
111. Swedish Gas Technology Centre Ltd. (SGC), “Basic data on biogas”, 2012.
112. S. Haybittle, “Biogas as a road transport fuel. An assessment on the potential role of biogas as a renewable transport fuel”, England, 2006.

- 113.** M. Persson, O. Jonsson y A. Wellinger, “Biogas upgrading to vehicle fuel standards and grid”, IEA Bioenergy, pp. 1-32, 2007.
- 114.** Schmack Biogas, “Producing and using biogas”, The practical guide to AD, primera edición, pp. 59-80, 2014.
- 115.** Clarke Energy, “Clarke energy: a Kohler Company”, *Syngas Cogeneration / Combined Heat & Power*, 2014. [En línea]. Disponible: <https://www.clarke-energy.com/synthesis-gas-syngas/>. [Accedido: 09-Oct-2016].
- 116.** A. V. Bridgwater, “Renewable fuels and chemicals by thermal processing of biomass”, *Chem. Eng. J.*, vol. 91, n.º 2-3, pp. 87-102, 2003.
- 117.** A. Oasmaa y C. Peacocke, “Properties and fuel use of biomass-derived fast pyrolysis liquids. A guide”, *Vtt Publ.*, vol. 731, p. 79 p. + app. 46 p., 2010.
- 118.** J. Lehto, A. Oasmaa, Y. Solantausta, M. Kytö y D. Chiaramonti, “Fuel oil quality and combustion of fast pyrolysis bio-oils”, *VTT Publ.*, n.º 87, p. 79, 2013.
- 119.** ASTM International, “ASTM D7544-12”, Standard Specification for Pyrolysis Liquid Biofuel, 2012.
- 120.** H. Jääskeläinen, “DieselNet technology guide”, *Biodiesel Standards & Properties*, 2009.
- 121.** I. Barabás y I. A. Todorut, “Biodiesel quality, standards and properties”, *Biodiesel: quality, emissions and by-products*, G. Montero y M. Stoytcheva, pp. 3-28, 2011.
- 122.** International Fuel Quality Center, “Setting a quality standard for fuel ethanol”, 2004.
- 123.** A. S. Amarasekara, “Handbook of cellulosic ethanol”, Estados Unidos: Scrivener Publishing, 2014.
- 124.** U. S. Department of Energy, “Handbook for handling, storing, and dispensing E85 and other ethanol-gasoline blends”, 2016.
- 125.** A. C. Hansen, D. C. Kyritsis y C. fon F. Lee, “Characteristics of biofuels and renewable fuel standards”, *Biomass to Biofuels: Strategies for Global Industries*, A. A. Vertés., N. Qureshi, H. P. Blaschek y H. Yukawa (editores), John Wiley & Sons Ltd., pp. 1-26, 2010.

Aplicaciones biotecnológicas de los residuos madereros

La madera se considera un material versátil, puesto que no solo se utiliza como fuente de energía o como material estructural (por sus propiedades mecánicas y su aspecto), sino que también es útil para la elaboración de productos de consumo no alimenticios, tales como farmacéuticos, pinturas, adhesivos, textiles, compuestos poliméricos, cosméticos, papeles y diversos productos básicos.^[1,2] La diversidad de especies madereras en todo el mundo y los niveles elevados de producción y disponibilidad mundial hacen que se puedan fabricar productos en su gran mayoría derivados de los componentes estructurales de la madera. La celulosa es el componente que tiene el mayor porcentaje en la madera y demuestra atributos útiles por su estructura química: proporciona una alternativa para la producción de biomateriales nuevos.^[1]

Integrar la producción de bioenergía, biocombustibles y bioquímicos, a través de avanzados procesos tecnológicos de separación y conversión, es una opción viable si se desea, por un lado, maximizar el valor de la madera y la eficiencia en los procesos de aprovechamiento y, por otro, minimizar los residuos,^[3,4] dado que se garantizaría la conversión de la mayor parte de la materia prima en productos de mayor valor, incluidos los químicos, biomateriales y combustibles más comercializables, como el etanol y el hidrógeno.

Se considera que el aserrín y el polvo de madera, compuestos de partículas pequeñas y finas generados como subproductos en los aserraderos, son un recurso importante para muchos productos de celulosa, tales como pulpa, papel, textiles, materiales de construcción y tableros de partículas; y para obtener derivados de celulosa, como ésteres y éteres.^[1] Es así como recientemente se ha incentivado su utilización no solo para remediar la contaminación ambiental, sino para darle valor a este residuo desde el punto de vista económico.

A continuación, se describen algunas aplicaciones biotecnológicas de los residuos de la madera, entre las que se encuentran elaboración de pulpa para papel, pulpa para fibras textiles, de adhesivos y de bioadsorbentes basados en taninos.

1. Elaboración de pulpa para papel

La madera es la principal fuente de fibras y la más utilizada para la fabricación de papel; no obstante, se utilizan otros materiales ricos en fibras celulósicas, como lo son el papel reciclable y los residuos agrícolas no maderables como bagazo, paja de cereales, bambú, lino, yute e, inclusive, trapos de algodón.^[5,6] Dentro de las especies maderables comúnmente se utilizan las coníferas o maderas blandas, preferidas por su alto contenido de celulosa, lo que se traduce en altos rendimientos; eso sí, no debe olvidarse que el principal objetivo es eliminar la lignina, lo que se realiza en etapas como el pulpado y blanqueamiento.

La producción de papel es un proceso industrial ampliamente conocido; aunque técnicamente es complejo, en principio es simple y se desarrolla en dos etapas: a) la fibra del material celulósico es convertida en pulpa y b), tradicionalmente, la pulpa es convertida en papel. Se conjugan diferentes procesos térmicos, químicos o mecánicos para la separación de las fibras, que se extienden en forma de capas en suspensión sobre la superficie de una pantalla de malla móvil (entrelazada), a fin de formar una banda de papel húmedo que se prensa para eliminar agua y consolidar la malla de fibra; finalmente, se seca para así formar papel.^[5,7] Sin embargo, los grandes consumos de energía y los productos químicos requeridos contribuyen a aumentar los índices de contaminación ambiental; además, reducen la eficiencia y, en virtud de ello, ayudan a incrementar los costos operacionales.^[5,6]

Es aquí donde la biotecnología juega un rol importante: su potencial reside en la especificidad de las reacciones químicas mediante el uso de microorganismos o enzimas selectivas, que aumentan el rendimiento de la pulpa, mejoran las propiedades de la fibra, ahorran energía, reducen los problemas ambientales y merman costos porque permiten un aprovechamiento racional de los residuos.^[6]

La **Figura 5-1** presenta los pasos del proceso de elaboración del papel; pueden identificarse etapas importantes como la preparación y manipulación de materias primas, la fabricación de pulpa o pasta celulósica, el lavado y tamizado de celulosa, la recuperación química, el blanqueo y la conversión de la pulpa en papel. Los residuos ingresarían directamente a la fase de digestión.

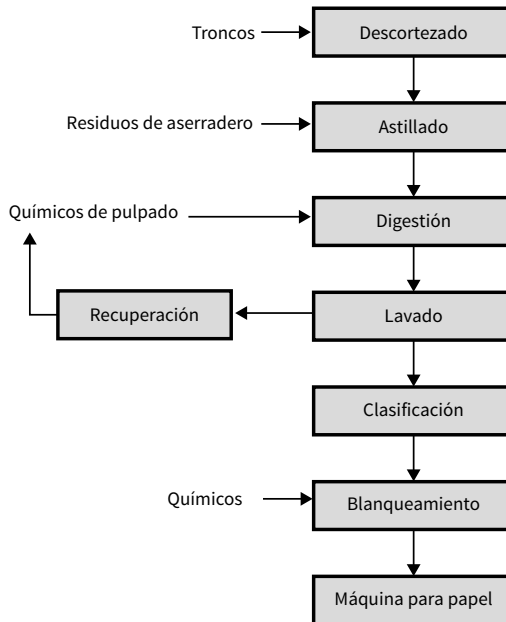


Figura 5-1. Proceso de obtención química de la pulpa y del papel.
Tomada y modificada de^[7]

Cuando se utiliza la madera como materia prima, la preparación incluye descortezado (el cual se hace hidráulicamente: mediante chorros de agua a alta presión; o mecánicamente: rozando los troncos unos con otros o con herramientas metálicas de corte) y astillado. Como generalmente se producen astillas de diferentes tamaños, estas pasan por cribas, que las clasifican por longitud y grosor, de manera que las dimensiones sean las especificadas para la preparación de la pasta, y haya un flujo constante a través de los refinadores, así como un nivel de reacción uniforme en los digestores.

La lignina se presenta como el compuesto objetivo que se debe eliminar; para lograrlo, los enlaces dentro de la estructura de la madera deben romperse, pero evitando la descomposición de la celulosa, lo que da origen a la etapa que se conoce como el pulpado, en la cual se emplean métodos mecánicos y químicos.

El pulpado mecánico hace uso de la fuerza mecánica: se tritura la madera contra piedras o entre placas metálicas con el objetivo de ablandar o destruir la estructura de la lignina y separar las fibras de celulosa; así se obtienen rendimientos por encima del 85% y se produce papel con alto volumen, buena capacidad y excelentes características de impresión. Sin embargo, este proceso tiene un alto consumo energético, las propiedades de resistencia son más bajas que en las pulpas químicas y no pueden ser blanqueadas a altos niveles de brillo; así que el papel producido tiene fibras cortas, baja resistencia, tonos altos, alta opacidad y facilidad de tornarse amarillo y quebradizo con el tiempo.^[5, 8] Por lo anterior, se le han acoplado procesos químicos y térmicos con el fin de obtener una pulpa con calidad final superior a la obtenida por refinación mecánica, y, por ende, mejores propiedades físicas del papel. Estos procesos de pulpado combinados se conocen como termomecánicos y químicomecánicos.^[9]

Por otra parte, el pulpado químico implica el uso de reactivos químicos en un digestor a temperaturas elevadas (entre 130 °C y 170 °C) para degradar y disolver la lignina por medio de reacciones químicas; luego de que la mayor parte de la lignina ha sido removida, las fibras pueden ser separadas mediante desfibración mecánica. Debido al ataque químico y a la baja selectividad en el proceso, se da la degradación de polisacáridos y de otros componentes no fibrosos de la madera, lo que lleva a bajos rendimientos, entre el 45% y el 55%,^[5, 8] aun cuando se puede producir un papel con alta resistencia y una mayor esperanza de vida, pues se obtiene fibras más largas y más fuertes. Las pulpas celulósicas fruto de este proceso pueden producirse por medios alcalinos, usando sulfato o *kraft* ($\text{NaOH} + \text{NaSO}_2$), o por medios ácidos, usando, por ejemplo, sulfitos. En la actualidad, el pulpado químico es el método más empleado: representa el 75% de la producción de pulpa en todo el mundo.^[10]

En general, los procesos de elaboración de la pulpa difieren en el rendimiento y la calidad del producto final; si se utilizan métodos químicos, los productos químicos utilizados y la proporción que puede recuperarse para

reutilización son diferentes. En la **Tabla 5-1** se pueden apreciar las características y los usos finales de la pulpa obtenida y los rendimientos de acuerdo con el proceso escogido.

Tabla 5-1. Rendimientos de los procesos de pulpado y características y usos de la pulpa obtenida.

Proceso	Color de pulpa	Rendimiento (%)	Uso
Pulpado termomecánico.	Café.	> 95	Cartoncillo, papel periódico y bolsas de papel.
Pulpado quimtermomecánico.	Café claro.	85-95	Papel periódico y papeles especiales.
Semiquímico pulpado.	Beige-café	60-80	Papel periódico.
Pulpado químico kraft, sulfito.	Café claro.	40-50	Papel periódico y papeles.

Estos métodos tienen como factor común altos costos de capital, altos consumos de energía o de reactivos químicos y generación de subproductos con valores comerciales relativamente bajos.^[7]

Biopulpado

El biopulpado surge ante la necesidad de darles solución a las dificultades que se presentan en los anteriores procesos y, por supuesto, con el fin de mejorarlos. Algunas de sus ventajas: ahorros en consumos energéticos, reducción significativa de contaminantes en el aire (incluyendo el CO₂ y algunos compuestos sulfurados que causan olores) y mejoras en la calidad del papel y en la competitividad económica.^[7,11] El biopulpado es definido como un pretratamiento fúngico de los materiales lignocelulósicos, en el cual se degrada parcialmente la lignina previo a la elaboración de la pulpa, bien sea con procesos químicos o mecánicos.^[12] Los cambios inducidos por los agentes biológicos empleados, como microorganismos o enzimas puras, eliminan parte de la lignina y la modifican permanentemente, favoreciendo

así la penetración química en los procesos posteriores, lo que podría resultar en mayor facilidad de blanqueo, bajos números $kappa$, reducción de los tiempos de digestión y temperatura, reducción de los químicos necesarios para pulpa y reducción de la carga de desechos en el efluente.^[8]

El principio de este proceso está basado en la capacidad que poseen algunos hongos, principalmente los llamados “hongos de la pudrición blanca”, para colonizar y degradar selectivamente la lignina presente en la madera, dejando así la celulosa relativamente intacta,^[6] sin embargo, algunos no son tan selectivos y durante el proceso se pierden grandes cantidades de polisacáridos importantes en la constitución de la fibra.^[13] El pretratamiento remueve algo de lignina y modifica la lignina remanente, facilitando, de esta manera, la remoción total de la lignina en el siguiente paso del proceso de pulpa.^[8] La descripción de la inclusión del biopulpa en los procesos convencionales de elaboración de pulpa se puede ver en la **Figura 5-2**.

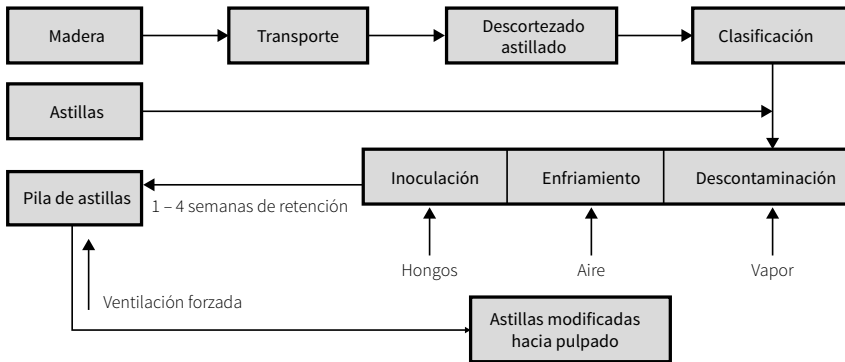


Figura 5-2. Proceso de biopulpa.
Tomada y modificada de^[11]

Los hongos de la pudrición blanca son hongos filamentosos, que emplean la madera como alimento, específicamente sus componentes estructurales. El proceso de descomposición comienza con la aparición de zonas blancas, que indican los lugares donde la lignina ha sido removida o parcialmente modificada.^[2] Se han logrado identificar las enzimas responsables de los procesos de biotransformación, entre las cuales se encuentran las lacasas,

lignina peroxidasa (LiP) y manganeso peroxidasa, (MnP) y celobiosas deshidrogenasa (CDH),^[14,15] lo que les confiere importancia tanto en los procesos de biodegradación o biosíntesis de la lignina como en el blanqueamiento de la pulpa.^[15]

Estudios previos han reportado las mejoras significativas de la pulpa y de los procesos al aplicar biotratamientos previamente a los procesos de pulpado mecánico. Ferraz *et al.* emplearon *Ceriporiopsis subvermispota* en el tratamiento de astillas de *Pinus taeda* durante 15 días y lograron reducir el contenido de lignina y extractivos de los chips, incrementando así, significativamente, propiedades como el índice de tracción y el índice de rasgado en las biopulpas obtenidas;^[12] se reportó un aumento promedio del 35% en dichas propiedades y una reducción del consumo energético en un 33% respecto al proceso sin biotratamientos.

Pruebas similares se realizaron para *Eucalyptus globulus*,^[16] *Pinus nigra* Arn.^[17] y *Pino radiata*.^[18] se lograron rendimientos de la pulpa de hasta 3% y disminución de hasta 18% en requerimientos de reactivos químicos en el proceso *kraft*; así mismo, se observaron mejoras en propiedades como resistencia y brillo de la pulpa, lo que facilitó su posterior blanqueamiento y refinación. Por otro lado, se han realizado modelaciones económicas que permiten demostrar la viabilidad económica de este procedimiento. Se evidencia una reducción de costos operacionales de entre el 25% y el 40%, por lo que esta nueva tecnología demuestra tener un futuro prometedor.^[11,19]

La selección adecuada de la especie de hongo constituye la base de la eficiencia del proceso; es necesario realizar estudios previos sobre las especies maderables que se van a utilizar, con el fin de conocer el comportamiento de los hongos, su actividad y su crecimiento, a través de pruebas de biodegradación que lleven a conclusiones sobre la resistencia de la especie maderable frente a un biotratamiento y, por ende, al hongo seleccionado.

Se han realizado pruebas de laboratorio con más de 200 especies de hongos para identificar las que cuenten con un sistema enzimático altamente eficiente y descartar aquellas con poca capacidad selectiva frente a la lignina.^[13,20,21] En general, los hongos de pudrición blanca, especialmente los basidiomicetos, presentan una degradación eficiente y selectiva de la lignina;^[21,22] se ha estudiado ampliamente y obtenido muy buenos resultados en

los procesos de biopulpa al utilizar *Ceriporiopsis subvermispora*, pero no se descarta el uso de *Phlebia* spp., *Physisporinus rivulosus*, *Phanerochaete chrysosporium* y *Dichomitus squalens*.^[21]

En lo que respecta a la capacidad de biodegradación, los hongos de pudrición blanca se caracterizan por atacar preferiblemente a las maderas duras y raramente a las blandas.^[22] Una variedad de especies maderables ha sido estudiada con diferentes hongos de pudrición blanca: se ha evidenciado que la habilidad fúngica para degradar una especie de madera no es la misma para todas las demás. Dentro de las maderas duras estudiadas se encuentran el *Eucaliptus (grandis y globulus)*^[23-26] y madera de álamo,^[27,28] mientras que las maderas blandas estudiadas incluyen las especies *Pinus radiata* y *Pinus taeda*.^[20,29,30]

A pesar de los esfuerzos realizados, en la actualidad el biopulpa químico o biomecánico aún está en fase de desarrollo a escala piloto,^[6] y demuestra ser técnicamente factible a escala laboratorio.^[11]

Bioblanqueamiento

Esta etapa del proceso tiene como objetivo remover la lignina residual, hemicelulosa y extractivos presentes, que aún quedan luego del pulpa, obteniendo una pulpa y un papel, con brillo y tonalidades óptimas para sus diferentes usos. Este paso se hace empleando secuencias de tratamiento con reactivos, como cloro, dióxido de cloro, peróxido de hidrógeno y oxígeno,^[7] aunque, el uso de estos compuestos contribuye a la generación de compuestos organoclorados, los cuales además de ser peligrosos para el ambiente, lo son para la salud humana.^[10]

El bioblanqueamiento es una de las alternativas más prometedoras para reducir/eliminar sustancias químicas a base de cloro en el proceso de blanqueo de la pulpa; para ello se hace uso de enzimas fúngicas, principalmente las ligninolíticas, que incluyen manganeso peroxidasa (MnP), lignina peroxidasa (LiP) y lacasas, con las que se han obtenido resultados positivos en el blanqueamiento de pulpas libre de cloro.^[31] Adicional a este grupo de enzimas, se ha hecho común el uso de xilanasas, disponibles en el comercio, de origen fúngico o bacteriano, las cuales remueven el xilano por el

rompimiento de los enlaces covalentes entre la hemicelulosa y la lignina;^[31] a pesar de que la enzima no ataca directamente la lignina, se tiene la teoría de que durante el rompimiento de estos enlaces se crean poros en las fibras que facilitarían los procesos de blanqueamiento: se incrementaría el brillo de la pulpa y se disminuiría el número *kappa*.^[32]

En adición, el uso de hongos de pudrición blanca se ha estudiado recientemente para el blanqueamiento de pulpas químicas, pues se atacaría directamente la lignina de manera eficaz y específica, incluso cuando la cantidad de lignina residual sea baja. Sin embargo, una deficiencia grave del proceso de blanqueo con hongos es el largo tiempo de incubación requerido para el contacto con la biomasa, lo que incrementa drásticamente el tiempo del proceso y, por ende, afecta la viabilidad económica del mismo.^[6]

Parámetros para la producción de la pulpa

La calidad de la materia prima que se empleará, en este caso los residuos, es el aspecto más importante en la elaboración de papel, en especial para el proceso de pulpado. Los residuos se caracterizan, preliminarmente, por su composición química, en términos de cantidad de celulosa, hemicelulosa y lignina, humedad y extractivos, densidad (que influye en el transporte y embalaje a la caldera), color (pulpas de madera más blancas requieren menos blanqueo) y morfología de las fibras; con todos estos parámetros se determina la aptitud para convertirse en pulpa.

Características químicas

- **Contenido de celulosa.** El papel, al ser un material netamente celulósico, requiere que este componente sea abundante en la materia prima, con una proporción mayor en relación con el contenido de lignina, compuesto considerado indeseable. Altos contenidos de celulosa favorecerán la obtención de papel de mejor calidad, además de incrementar los rendimientos en la obtención de la pulpa; mientras que altos contenidos de hemicelulosa aportarán propiedades físicas al papel como resistencia a la tensión, explosión y doblez de la hoja de pulpa.^[33]

- **Contenido de lignina.** Los altos contenidos de lignina disminuyen la calidad de la pulpa resultante e incrementan el costo de la fase de blanqueamiento, dado el alto consumo de químicos necesarios para su completa eliminación.^[33] Las especies de madera empleadas normalmente en la producción de pulpa tienen una composición de lignina promedio entre 25% y 30%,^[34] por lo cual es recomendado que durante la búsqueda de nuevas especies y la aplicación de residuos en la elaboración de pulpa para papel, el contenido de lignina no supere el 25%, con el fin de evitar el consumo adicional de reactivos, la disminución del rendimiento de la pulpa y la generación de sólidos durante la recuperación del licor.^[35]
- **Contenido de humedad.** La humedad de la madera debe ser lo más alta posible: sobre el 35%, con el objetivo de exceder el punto de la saturación de la fibra.^[10]
- **Contenido de extractivos.** Los extractivos son compuestos de bajo o moderado peso molecular, solubles (extraídos) en solventes orgánicos o agua.^[36] Incluyen hidrocarburos alifáticos y aromáticos, terpenos y sus derivados, alcoholes, aldehídos, fenoles y quinonas.^[10,37,38] Un alto contenido de extractos puede generar problemas en la calidad de la pulpa y afectar, finalmente, las propiedades del papel. Se ha evidenciado formación de depósitos y posterior corrosión de los equipos, aparición de puntos negros o agujeros en las pulpas blanqueadas y disminución del área de unión activa entre las fibras en la lámina y con ello se disminuye la resistencia del papel lo que implica afectación de propiedades como fricción, adsorción de agua y humectación.^[6,15,37] Así mismo, disminución considerable del rendimiento en el proceso de pulpado, que, a su vez, conduce a un aumento en el consumo de productos químicos o de energía.^[10,38]

Los extractivos también son responsables de los problemas de tono en los papeles, lo que llevaría a que durante el envejecimiento, la pulpa y el papel sufran la reversión del brillo, es decir, una disminución de la luminosidad o del color absoluto, debida a una mayor absorción de la luz.^[10] Por las razones anteriores, hay restricción frente al uso de corteza en la elaboración de papel; debido al color oscuro de la corteza y al alto contenido de extractivos, es necesario incrementar el uso de reactivos químicos durante las fases de pulpado y blanqueado.^[7]

Así las cosas, los residuos con bajo contenido extractivo son más deseables para la obtención de la pulpa y se consideran aceptables aquellos cuyo contenido de extractivos se encuentre en el rango de 1,5 a 6 % wt^[39] Las especies de *Pinus* y *Eucalyptus* comúnmente cumplen con esta condición, por lo que son empleadas para la elaboración de papel.

Dentro de las propiedades físicas se analiza la “densidad de la madera”, que se relaciona con los gastos de transporte, la capacidad de producción de pulpa, la cantidad química y el consumo de energía.^[37,39] La densidad es una de las características más significativas de las materias primas para la producción de papel y pulpa de buena calidad, puesto que permite determinar el rendimiento de las fibras por volumen de madera; en otras palabras, el volumen de madera requerido para hacer una tonelada de pulpa.^[40,41] Se plantea que madera de densidades bajas facilita la elaboración de la pulpa por presentar menores requerimientos alcalinos en la digestión, un mayor rendimiento en el pulpado (entrega una pulpa final de mayor viscosidad) y un licor residual con menor cantidad de sólidos, lo que favorece el blanqueamiento de la pulpa; entre tanto, las de mayor densidad proporcionan una pulpa refinada con mejor opacidad y coeficiente de dispersión de luz.^[42]

Se reportan diferentes valores de densidad para las especies maderables en el rango de 500 a 800 kg/m³, siendo preferibles para la industria de la pulpa y el papel las densidades entre 400 a 600 kg/m³.^[39]

Características físicas. La madera tiene una estructura anatómica compleja que es responsable en parte de determinar las propiedades mecánicas y físicas de todos sus productos, incluyendo la pulpa (*kraft* y mecánica) y la aserrada. La diversidad anatómica exige un alto grado de comprensión científica y técnica de sus propiedades físico-químicas, morfológicas y anatómicas, a fin de obtener su utilización correcta y optimizada para la pulpa y el papel.

Cada tejido de madera está compuesto por una variedad de tipos de células diferentes que tienen, a su vez, diferentes funciones en el árbol vivo, es decir, soporte, transporte o almacenamiento. Las fibras son células alargadas, flexibles, tubulares, cilíndricas y muy pequeñas, obtenidas de

ciertas plantas o partes de plantas y que forman una red básica en el papel. Su diámetro es bastante delgado y se considera microscópico, es decir, < 0,1 mm; su función primaria es proporcionar apoyo mecánico al árbol, aunque también participan en el transporte de agua. Las características de las fibras varían entre plantas, por lo que analizar su morfología, longitud y ancho proporciona un indicativo del potencial que tiene la especie para la elaboración de papel; además, son importantes para determinar la calidad de la fibra de la pulpa y para predecir sus propiedades mecánicas.

- **Longitud de la fibra.** La longitud de una fibra es considerablemente variable: de aproximadamente 0,5 mm a más de 120 mm. Las especies coníferas o maderas blandas proporcionan una fibra larga con una longitud que va desde los 1,5 mm hasta los 4,5 mm y son aprovechadas en procesos de pulpado mecánico debido a la resistencia que les confiere su longitud,^[15] además de ser empleadas para la producción de papeles que requieren altas resistencias, como aquellos utilizados para empaques.^[43] Por su parte, las especies latifoliadas o maderas duras poseen una fibra corta, con una longitud entre 0,8 y 1,2 mm; son adecuadas para procesos de pulpado químico, con características de opacidad y suavidad, y favorecen la elaboración de papeles para impresión y escritura.^[43] La **Tabla 5-2** presenta la aplicación de las fibras según su longitud y origen.

Para las fibras de papel comunes, la relación de longitud-diámetro está en el intervalo de 50-200:1, siendo la relación común 100:1.^[37,44] Sin embargo, las pulpas de fibras largas son a menudo mezcladas con pulpas de fibras cortas para obtener mejores propiedades en el papel: cuanto mayor sea la longitud de la fibra, mayor será la resistencia al desgarramiento de aquel, lo que da la posibilidad de obtener nuevas características y aplicaciones del papel final producido.^[45]

Tabla 5-2. Longitud de fibra y su aplicación en la elaboración de papel.

Parámetro	Latifoliadas	Coníferas
Tipo de fibra.	Corta.	Larga.
Longitud fibra.	0,8 mm-1,2 mm	1,5 mm-4,5 mm
Longitud promedio.	1 mm	3 mm
Características proveídas.	Volumen, opacidad y suavidad.	Resistencia adicional, apto también para escritura e impresión.
Productos típicos.	Papeles de escritura, papeles de impresión y pañuelos de papel.	Empaques para envíos, bolsas de mercado y cajas de cartón corrugado.

Tomada y modificada de^[43, 45]

- Morfología de la fibra.** Juega un papel importante en la determinación de la fuerza o resistencia del papel obtenido debido a la habilidad que poseen las fibras para hincharse y formar enlaces interfibras; la fuerza de las fibras puede disminuir en los tratamientos mecánicos y químicos cuando los componentes son degradados, en especial la celulosa.^[46] Estos enlaces se forman mediante la interacción de la celulosa y la hemicelulosa por medio de puentes de hidrógeno. Algunos autores señalan esta característica de gran importancia en la determinación final de la calidad y dejan en un segundo plano la longitud de la fibra.^[41] Las características morfológicas de esta, tales como longitud, diámetro y ancho del lumen, permitirán hallar los valores para los parámetros de la **Tabla 5-3**, que contribuyen a la determinación del potencial de la fibra en la elaboración de pulpa y papel.

Tabla 5-3. Parámetros determinantes para la elaboración de papel derivados de la morfología de la fibra.

Parámetro	Influencia en la pulpa y el papel	Expresión	Valor deseado
Espesor de la pared celular.	Negativamente, incrementando la resistencia al dobléz de la fibra.	$E = (D - A)/2$	$E < (A/2)$
Relación de Runkel.	Positivamente en el rendimiento de la pulpa, pero negativamente en la digestibilidad.	$Ru = 2E/A$	$Ru < 1$
Coefficiente de flexibilidad.	Incrementa la resistencia al rasgado y a la tensión.	$CF = L/A$	$CF > 0,5$
Coefficiente de esbeltez.	Incrementa la resistencia al rasgado.	$CE = L/D$	$CE > 70$
Factor de forma de luce.	Incrementa la resistencia de la pulpa al batido.	$FFL = \frac{(D^2 - A^2)}{(D^2 + A^2)}$	Se recomiendan valores altos.
Factor de sólidos.	Valores altos disminuyen la densidad de la hoja.	$FS = (D^2 - A^2) \times L$	

Tomada y modificada de^[37,47]

Características de los residuos preparados

- **Descortezado.** La corteza no es utilizada durante el pulpado debido a que es resistente a este proceso; contiene un alto porcentaje de extractivos (entre 10% y 30% dependiendo de la especie) y retiene la suciedad, lo que reduce los rendimientos de la pulpa y genera corrosión en los equipos empleados.^[7,48] Otros impedimentos son su corta longitud de fibras presentes, que disminuye la interacción interfibril (lo que afecta, a su vez, la resistencia del producto final) y el requerimiento de mayor cantidad de productos químicos en las etapas de pulpado y blanqueo debido a su color oscuro.^[6,48] No obstante, durante los procesos industriales de elaboración de papel se utiliza entre 0,3% y 0,5% de corteza, siendo el proceso *kraft* el más tolerante porque las partículas de corteza son solubles en el licor alcalino.^[6,7]

Es así como la corteza representa para gran parte de los aserraderos e industrias un subproducto mayoritario, que generalmente se quema para la generación de energía, aun cuando se pueden extraer muchos compuestos orgánicos, tales como ácidos resínicos, ácidos grasos y materiales altamente coloreados.^[7]

- **Tamaño del chip.** La uniformidad de la distribución del tamaño del chip, la densidad aparente y la ausencia de contaminantes son los factores más importantes que determinan la calidad del chip para la fabricación de la pulpa. Los chips de tamaño aceptable se suelen aislar de los finos y de las piezas de gran tamaño haciéndolas pasar sobre pantallas vibratorias de varias etapas; al final, los chips de tamaño grande son “rechipeados” y las partículas finas se queman generalmente con la corteza. Para la elaboración de pulpa, típicamente se utilizan chips entre 15-30 mm de largo y ancho y entre 2-5 mm de espesor (madera blanda de 25x25x4 mm³; madera dura 20x20x3 mm³).^[7,10]

2. Elaboración de pulpa para fibras textiles

Una fibra textil es una unidad de materia, natural o manufacturada, que forma el elemento básico de tejidos y otras estructuras textiles.^[49] Se caracteriza por tener una longitud de al menos 100 veces su diámetro y una forma gracias a la cual puede ser hilada en un hilo o fabricada en una tela por diversos métodos.^[50] Debe ser lo suficientemente fuerte para mantener su forma, lo suficientemente flexible para ser convertida en una tela o hilo, lo suficientemente elástica para estirar y lo suficientemente resistente para durar.^[49,51] Por lo tanto, no todas las fibras se pueden utilizar para hacer textiles. Por ejemplo, las plantas de algodón contienen fibras que son lo suficientemente fuertes y flexibles para el hilado; mientras las fibras de mazorca tienen estructuras similares a pelos, demasiado débiles para ser hiladas en un hilo sin romperlas, por lo que no son adecuadas para textiles.

La **Figura 5-3** presenta la clasificación de las fibras empleadas en la industria textil. El primer grupo está conformado por aquellas fibras que se encuentran en estado natural y que no exigen más que una ligera adecuación

para ser hiladas y utilizadas como materia textil; generalmente, este tipo de fibras solo podría producir un hilo de fibra (fibras cortas), que no es demasiado largo al compararlo con fibras sintéticas. El segundo grupo incluye una gran diversidad de fibras que han sido fabricadas mediante el procesamiento de polímeros orgánicos naturales o sintéticos en una sustancia formadora de fibras, por lo que este tipo de fibras son conocidas como sintéticas. Las fibras celulósicas están hechas de polímeros celulósicos (fibrosos) regenerados o derivados, tales como madera o algodón. A diferencia de las fibras naturales, sus propiedades se pueden determinar y controlar antes de su producción.

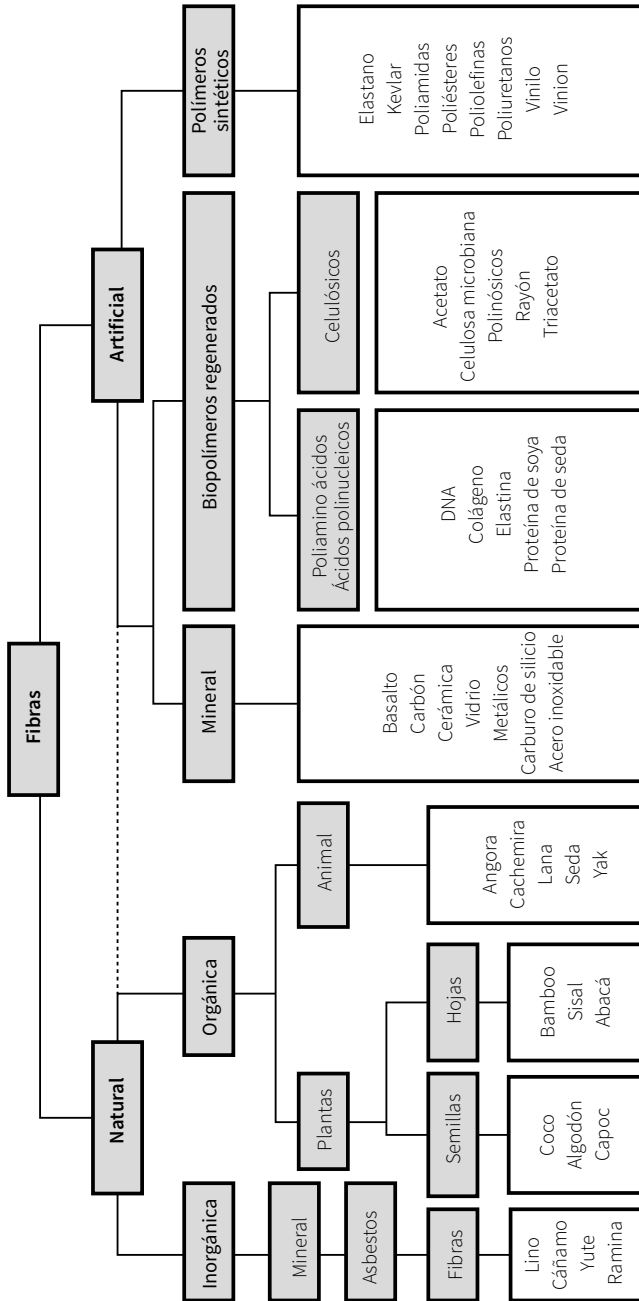


Figura 5-3. Clasificación de las fibras textiles.
Tomada y modificada de [9]

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente, este apartado se enfocará en el proceso de elaboración de fibras artificiales, en especial de las que le competen a la temática abordada, es decir, las fibras celulósicas; este proceso comprende desde la elaboración de la pulpa “disuelta” hasta su transformación en fibras.

Obtención de pulpa disuelta

La expresión pulpa disuelta hace referencia a pulpas de celulosa altamente purificadas, con un contenido de celulosa mayor del 90% y cuya producción es similar a la elaboración de pulpa para papel, con algunas modificaciones dadas las exigencias en pureza del producto final.^[53] Su producción mundial ha experimentado un crecimiento en los últimos 10 años por su relación directa con el crecimiento poblacional.^[54] China es el principal productor de pulpa disuelta, y la emplea para la elaboración de fibras textiles como el rayón: destina alrededor del 62% de este tipo de pulpa para la fabricación de textiles.^[55]

En la actualidad se encuentran en desarrollo trabajos prospectivos que apuntan a la búsqueda de nuevas materias primas para la elaboración de pulpa disuelta, como el bambú, especie originaria del continente asiático y con una composición química similar a la de muchas especies maderables.^[56] El algodón y la madera son las materias primas que tradicionalmente han sido empleadas para la producción de la pulpa disuelta, con una participación del 10% y del 85%, respectivamente; se destaca el uso de especies coníferas pertenecientes a los géneros *Picea* y *Pinus*, y latifoliadas de los géneros *Fagus* y *Eucaliptus*.^[53]

En cuanto al proceso para la obtención, existen diferencias entre la elaboración de pulpa disuelta y la elaboración de pulpa para papel; la principal de ellas radica en la presencia de la hemicelulosa, compuesto que es tolerable durante la elaboración de pulpa para papel, pero que durante la elaboración de pulpa disuelta debe ser removido casi en su totalidad debido a los pentosanos que lo componen, los cuales interfieren en la conversión química de la celulosa en los productos finales.^[10] Así mismo, la pulpa disuelta, a pesar de tener propiedades interesantes como alto contenido celulósico y un brillo más alto en comparación con la pulpa para papel, no resulta ser

adecuada para los procesos papeleros, ya que dadas las exigentes condiciones de proceso a las cuales se somete la materia prima, se verían afectadas propiedades como la resistencia en el producto final, relativamente inferior a la de los procesos convencionales.^[57] Otra diferencia que cabe mencionar son los rendimientos que se obtienen en el aprovechamiento de la materia prima, los cuales, durante la elaboración de pulpa disuelta, son notablemente menores por la gran cantidad de rechazos que se generan durante el proceso. Los rendimientos promedio pueden verse en la **Tabla 5-4**.^[58]

La pulpa disuelta convencionalmente puede ser obtenida por dos métodos: el ácido sulfito (AS) y el llamado prehidrólisis *kraft* (PHK), ambos procesos químicos, con ventajas, desventajas y limitaciones; pese a que han sido establecidos desde la década de los 50, hoy en día no han sufrido mayores modificaciones.^[54]

Tabla 5-4. Rendimiento de la madera en la obtención de diferentes pulpas comerciales.

Tipo de proceso	Método	Rendimiento %
Químico.	Ácido sulfito*, bisulfito, sulfito multipasos, alcali sulfito antraquinona, <i>kraft</i> , polisulfido- <i>kraft</i> , prehidrólisis <i>kraft</i> *, soda.	35-65
Semiquímico.	NSSC, licor verde, soda.	70-85
Quimimecánico.	Quimitemomecánica (CTMP), madera químico-tratada durante siembra (CGW).	85-95
Mecánico.	Termomecánica (TMP), mecánico-refinada (RMP), pulpado con piedras (SGW), pulpado aplicación presión (PGW).	93-97
*Los métodos resaltados son los descritos en este apartado.		

Tomada y modificada de^[59]

Prehidrólisis *kraft* (PHK). Es el más empleado en la producción industrial: abarca cerca del 56% de la producción mundial de pulpa disuelta.^[55] Comprende un proceso de designificación alcalina, en el cual se emplean

hidróxido de sodio (NaOH) y sulfuro de sodio (Na₂S). Las astillas de madera son tratadas previamente mediante una aplicación directa de vapor a temperaturas entre 160 °C y 180 °C o diluidas en un ácido mineral (H₂SO₄) a temperaturas entre 120 °C y 140 °C por un tiempo entre 30 y 180 minutos, durante el cual los grupos acetilo y formilo son liberados de la madera para formar ácido acético y fórmico, que hidrolizan selectivamente la hemicelulosa y producen carbohidratos solubles en agua.^[10]

Este paso es considerado crítico, pues es donde se da la mayor remoción de hemicelulosa y lignina, componentes indeseables en la pulpa final, para así continuar en los siguientes procesos. El proceso general con sus etapas puede verse en la **Figura 5-4**.

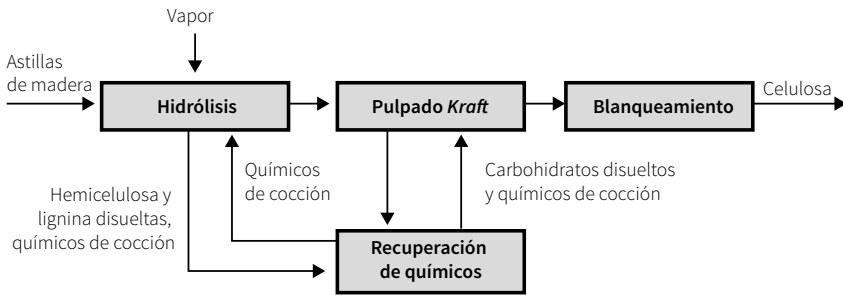


Figura 5-4. Esquema general del proceso de obtención de celulosa empleando el método de prehidrólisis kraft.

Tomada y modificada de^[59]

Una de las principales ventajas de este método es que puede ser aplicado para cualquier tipo de madera, mientras que el método por sulfito, en la mayoría de los casos, no puede ser usado en especies como el pino. Se destaca que en el total de la producción de pulpa lograda mediante este proceso, más del 70% de las especies empleadas son latifoliadas y que estas se ven favorecidas por características como buena deslignificación, bajo costo, disponibilidad de materias primas y altas densidades.^[60]

Método ácido sulfito (AS). El método ácido sulfito guarda algunas similitudes con el proceso kraft; se diferencian en aspectos como la composición del licor de digestión, que en este caso son ácidos sulfurosos, y la adición

de iones como sodio, magnesio, calcio y amonio.^[58] Los principales agentes químicos de este método son sulfito de hidrógeno y dióxidos de azufre. El método depende de las condiciones de pH para su desarrollo y puede ser llevado a cabo bajo condiciones neutras y alcalinas: en un proceso convencional usando calcio, el pH es de entre 1 y 2, pero si se usa magnesio, el pH puede tener un valor de hasta 5; en algunos casos raros, para el proceso con sodio, el pH tiene un amplio rango, incluso bajo condiciones alcalinas.^[61]

Las reacciones generales que ocurren en este proceso incluyen sulfonación, hidrólisis, condensación y redox.^[57] Durante las reacciones de sulfonación, principalmente es degradada la lignina, aunque durante el proceso, carbohidratos y productos de bajo peso molecular también se ven afectados. Las reacciones de hidrólisis marcan la diferencia con el método PHK debido a que mediante el uso de ácidos inorgánicos se produce un rompimiento de enlaces covalentes y puentes de hidrógeno formados entre lignina y carbohidratos (también se ve afectada la hemicelulosa); las reacciones de condensación ocurren entre unidades de lignina, intermediarios y extractivos. Y los procesos redox envuelven la incorporación de compuestos inorgánicos, además de la degradación de carbohidratos y extractivos.

En la **Figura 5-5** se presenta el diagrama de proceso, con la posibilidad de la recuperación de químicos y la valorización de residuos, principalmente de los azúcares provenientes de la hemicelulosa, para un proceso de fermentación que permita acoplarse a la producción de bioetanol.

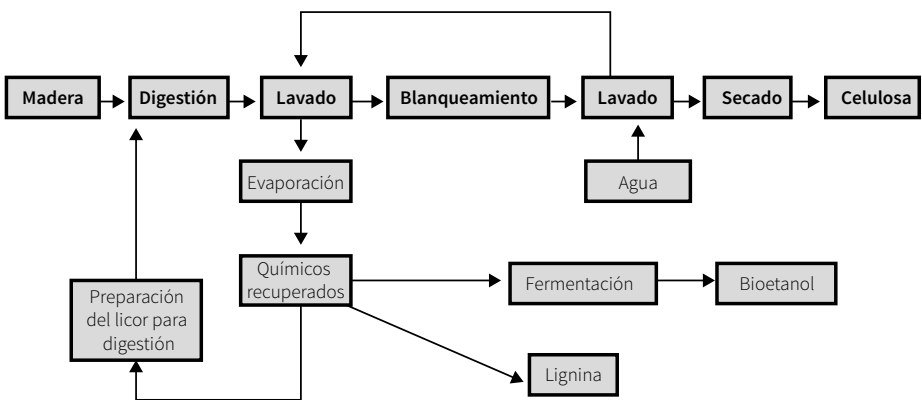


Figura 5-5. Proceso de producción de pulpa empleando el método ácido sulfítico.
 Tomada y modificada de^[57]

El método del sulfito produce una pulpa brillante y más fuerte, que es fácil de blanquear y de refinar para las aplicaciones de la fabricación de papel ^[7,57], lo que se considera como una ventaja. Entre otras ventajas que ofrece este método se encuentra la posibilidad de recuperar los compuestos o reactivos de carácter inorgánico empleados, de realizar un proceso de blanqueamiento libre de compuestos clorados y de recuperar los carbohidratos degradados para ser aplicados en fermentaciones y en la producción de bioetanol.^[6,57] No obstante, el método tiene desventajas, como su sensibilidad a especies de madera con alto contenido de resinas, lo que limita su aplicación para especies resinosas como el pino, y la obtención de pulpas con variabilidad en el peso molecular de las celulosas.^[7,15]

Uso de enzimas en la producción de pulpa disuelta

El uso de hongos y enzimas en la producción de pulpa disuelta ha sido investigado en los últimos 20 años por el incremento en el rendimiento del proceso y la disminución de costos (en cuanto a consumo de reactivos químicos). Su aplicación es similar a la empleada en los procesos de papel y es posible usar pretratamientos fúngicos o enzimáticos durante etapas previas (tal y como se mencionó en el apartado sobre el papel) con el fin de obtener más fácilmente la fibra, eliminar lignina, emplear menos reactivos en la etapa química y disminuir el consumo energético,^[38] aunque los mayores esfuerzos realizados en el proceso de obtención de pulpa disuelta para la producción de derivados de celulosa se han enfocado en la búsqueda de hemicelulosas, entre ellas, xilanasas y manasas, para el tratamiento de pulpas derivadas de los métodos ácido sulfito y prehidrólisis *kraft*, en gran medida debido a la característica de pureza de las pulpas obtenidas con estos métodos;^[62] así, son más efectivos los tratamientos enzimáticos, aunque algunos estudios destacan el aprovechamiento de la especie *Ceriporiopsis subvermispora* en el tratamiento de pulpa obtenida por el método ácido sulfito por la mejoría de características como viscosidad, resistencia, brillo y volubilidad alcalina.^[63]

A la hora de la selección de hongos para su posterior aplicación en pretratamientos de la madera, es necesario tener en cuenta diferentes criterios, como los sugeridos por Gellerstedt *et al.*:^[15] rápido crecimiento, habilidad

para crecer tanto en coníferas como en latifoliadas, capacidad selectiva frente a hemicelulosa y lignina y poca degradación de celulosa, habilidad para degradar extractivos o no ser inhibidos por estos, no patógenos, agresividad frente a otros microorganismos competidores, baja producción de pigmentos y buena esporulación para asegurar una rápida colonización de la madera.^[15]

Los mayores esfuerzos en biotecnología en cuanto al desarrollo de pulpas disueltas se han enfocado en la búsqueda de enzimas que ayuden en la remoción de la hemicelulosa. En la **Figura 5-6** se esquematiza la participación del tratamiento enzimático, comúnmente empleado en fases previas al blanqueamiento como medida para mejorar las propiedades finales de la celulosa y para la disminución en el uso de reactivos.^[6]

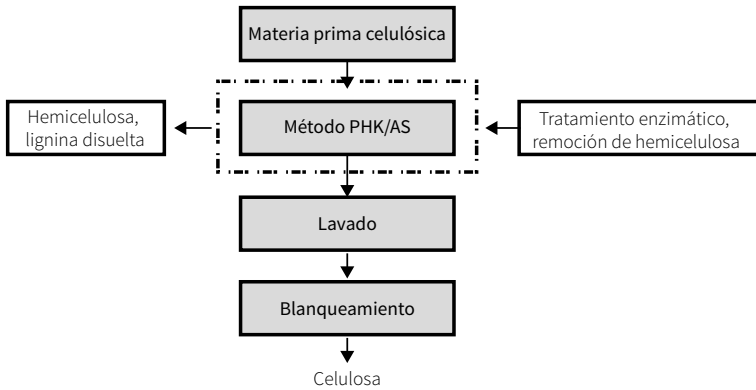


Figura 5-6. Modificación del proceso de obtención de celulosa para la elaboración de fibras empleando un tratamiento enzimático.

Entre las enzimas que son empleadas para la remoción de hemicelulosa se encuentran las hidrolíticas, xilanasas y manasas.

Xilanasas. Son un grupo de enzimas hidrolíticas, producidas por una gran variedad de bacterias y hongos, que se encargan de romper enlaces glicosídicos presentes en el xilano y se caracterizan por remover selectivamente pentosas presentes sin afectar otras estructuras (como la de la celulosa).^[6] Su aplicación tiene sus inicios en 1984, cuando se propuso el uso de estas enzimas de manera pura, provenientes del hongo *SchizopHyllum commune*,

para pretratamiento de especies latifoliadas. Se pudo demostrar una reducción del 20% al 10% en el contenido de xilano en las pulpas, pero sin lograr una completa remoción de la hemicelulosa debido a inconvenientes en la accesibilidad en el sustrato.^[64] El mecanismo de reacción se presenta en la **Figura 5-7**.

Su actividad enzimática se ha encontrado favorable durante su aplicación en las especies latifoliadas, lo que tiene sentido considerando que estas especies se caracterizan por que el principal componente de la hemicelulosa es la xilosa, con un contenido superior al 90%.^[65]

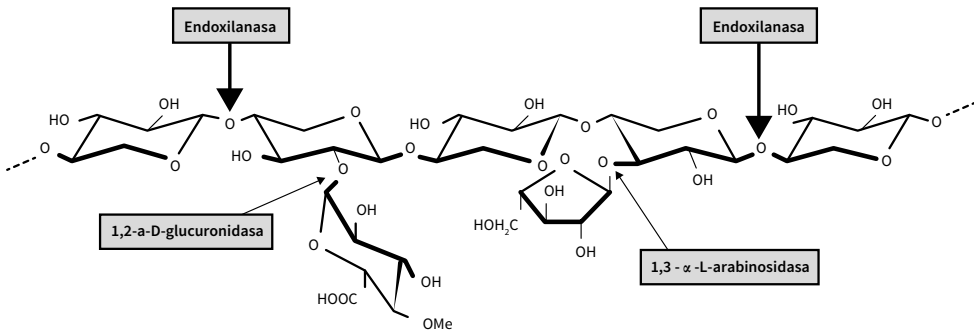


Figura 5-7. Mecanismo de acción del grupo enzimático de las xilanasas sobre la cadena de hemicelulosa facilitando la liberación de pentosas.

Tomada y modificada de^[15]

Los diferentes estudios sobre el uso de xilanasas apuntan a la reducción del uso de compuestos químicos, como en el tratamiento de pulpas *kraft* pino y abedul, en el cual logró reducirse en un 25% la carga de cloro activo.^[65] Otro resultado representativo fue la disminución del contenido de pentosas en un 50% por parte de una xilanasas extraída del hongo *Aureobasidium pullulans* sobre pulpas obtenidas por el método ácido sulfito.^[63]

Mananasas. Como las xilanasas, las mananasas comprenden una familia de enzimas hidrolíticas que ejercen su actividad sobre glucomananos, además de atacar la galactosa y el lado acetilado en la hemicelulosa.^[66] Su mecanismo puede verse en la **Figura 5-8**, es altamente selectiva por su

sustrato, pero con dificultades en el acceso a los enlaces en la molécula.^[65] Su acción y uso no han sido tan populares, como sí lo han sido las xilanasas, y se han aplicado solo en la etapa de blanqueamiento.

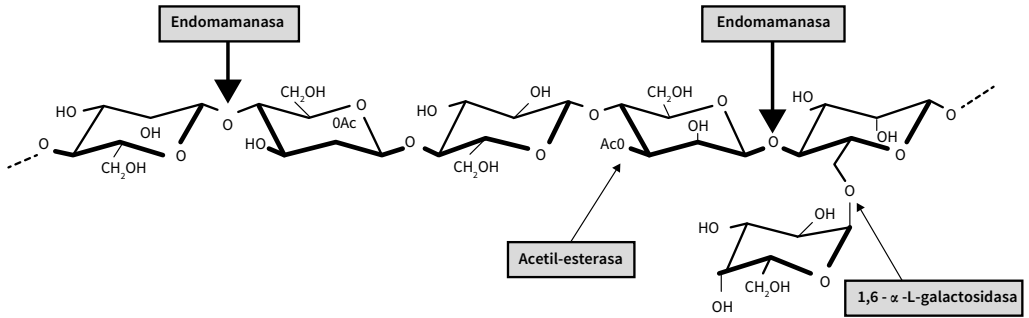


Figura 5-8. Mecanismo del grupo enzimático de las mananasas sobre la cadena de hemicelulosa.

Tomada y modificada de^[15]

Se ha demostrado que las mananasas poseen características sinérgicas con otras enzimas, por ejemplo, con las xilanasas; en el tratamiento de pulpa proveniente de especies coníferas, la combinación de xilanasas extraídas de *Thermomyces lanuginosus* y de mananasa extraída de *Sclerotium rolfsii* solubilizaron un 50% más de manano y un 11% más de xilano en comparación con las enzimas individuales.^[67] No obstante, se deben definir los factores que restringen la solubilización completa de la hemicelulosa e identificar las enzimas más eficaces para el diseño de nuevos procesos.

Obtención de fibras textiles: el rayón

La elaboración de fibras textiles empleando la madera como materia prima surgió a mediados del siglo XIX, cuando el científico francés Hilaire de Chardonnet logró obtener la primera seda artificial en cantidades comerciales nitrando fibras de algodón, derivadas de las hojas de morera, en una mezcla de ácido nítrico y ácido sulfúrico (como catalizador).^[68] Este método

fue utilizado para la producción de rayón. Aunque el proceso no era del todo eficiente y ahora es obsoleto, estableció el rumbo para el desarrollo de otras fibras de rayón comercialmente viables, por lo que Chardonnet se ha considerado el “padre del rayón”.^[51]

El rayón-viscosa es la forma moderna de uno de los primeros tipos de seda artificial. El nombre “viscosa” se derivó de la palabra viscoso para hacer referencia a la solución de hilatura pegajosa. La Comisión Federal de Comercio (FTC por sus siglas en inglés) define las fibras de rayón como aquellas que están compuestas por celulosa regenerada y como fibras fabricadas en las que los sustituyentes no han sustituido más del 15% de los hidrógenos de los grupos hidroxilos en la celulosa.^[51] El rayón-viscosa es, entonces, un derivado de la celulosa, pero no es clasificado, a pesar de ello, como una fibra natural, como sí son calificadas la seda, la lana y el algodón, por lo que se incluye en el grupo de fibras artificiales o “hechas por el hombre”.

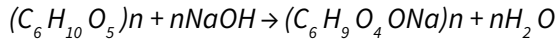
El rayón se produce a partir de la pulpa disuelta y durante el proceso las fibras de celulosa son disueltas y degradadas para posteriormente ser recuperadas; por esto también se conoce como “fibra de celulosa regenerada”. Además de las propiedades naturales del rayón, como resistencia e insolubilidad en muchos solventes orgánicos, existe un abanico de fibras derivadas con diferentes propiedades adicionales y especiales (como retardo al fuego, mayor resistencia), de acuerdo con las necesidades que presente el usuario final.^[60]

Pasos para la obtención de rayón

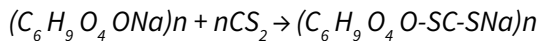
A continuación se presenta una breve descripción de los pasos realizados para la elaboración de fibras textiles rayón-viscosa a partir de la celulosa presente en la pulpa disuelta, incluyendo las reacciones químicas más representativas:^[10,60]

- a. Mercerización de las fibras.** Se agrega una solución alcalina de hidróxido de sodio, con concentración entre el 17% y el 20%, a temperaturas entre 18 °C y 25 °C. En este paso la celulosa es convertida en celulosa alcalina y se rompen enlaces intermoleculares para incrementar la solubilidad del xantato de celulosa que se generará en etapas posteriores.

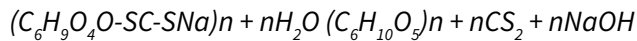
Inmediatamente después de formada la celulosa alcalina, se aplica presión a la mezcla y se remueve el exceso de líquido.



- b. Trituración.** La mezcla de celulosa alcalina, luego de ser presionada, es triturada de forma mecánica; así es llevada a diminutas partículas para incrementar su área superficial y facilitar las reacciones posteriores.
- c. Envejecimiento.** En este paso, las partículas blancas provenientes de la trituración son envejecidas por medio de la exposición al oxígeno bajo condiciones controladas con temperaturas entre 18 °C y 30 °C, disminuyendo así el grado de polimerización de la celulosa y su peso molecular en un factor de dos a tres, lo cual favorece su viscosidad.
- d. Xantación.** Se adiciona sulfuro de carbono (CS₂) a la solución alcalina envejecida a temperaturas controladas entre 20 °C y 30 °C, formando el xantato de celulosa. En esta fase, la mezcla adquiere una tonalidad amarilla.

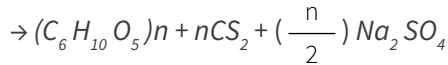
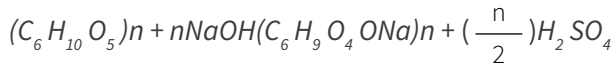


- e. Alcalinización.** Se vuelve a adicionar NaOH al xantato de celulosa con el fin de disolver la pasta, asegurando una distribución de las modificaciones sobre estructura; se generan algunas fracciones insolubles y la mezcla termina siendo llamada finalmente “viscosa”.
- f. Maduración.** La viscosa permanecerá en reposo de cuatro a cinco días, a una temperatura de 18 °C, lo que permitirá la redistribución y pérdida de los grupos xantato debido a que este proceso de xantación es reversible. En este estado de reposo se producirá una liberación de CS₂, lo que facilitará la regeneración de la celulosa, para, finalmente, lograr la formación de los hilos.



- g. Filtrado y desaireación.** La viscosa es filtrada para separar los compuestos insolubles y presionada para eliminar burbujas remanentes.

h. Hilado. La viscosa es filtrada aplicando presión a través de tubos; se emplea ácido sulfúrico (H_2SO_4), que se encargará de acidificar el xantato de celulosa, así lo descompone y favorece, a su vez, la regeneración de la celulosa. También se emplean otros compuestos como el sulfato de sodio y el sulfato de zinc, que intervienen y controlan la velocidad de descomposición y formación de las fibras. Finalmente, en este paso se obtienen los finos hilos de celulosa regenerada.



Las fibras son estiradas, favoreciendo así la interacción entre ellas y el establecimiento de enlaces de intercadenas, lo que favorecerá las diferentes propiedades finales, como la resistencia; luego viene un lavado, que removerá las sales contenidas y el resto de las impurezas, y dejará listos los filamentos para que puedan ser cortados, tal como se hace comúnmente con el procesamiento del algodón.

La secuencia de operaciones implicadas en la fabricación de rayón hasta la etapa de hilado puede ser discutida con el diagrama de flujo presentado en la **Figura 5-9**.

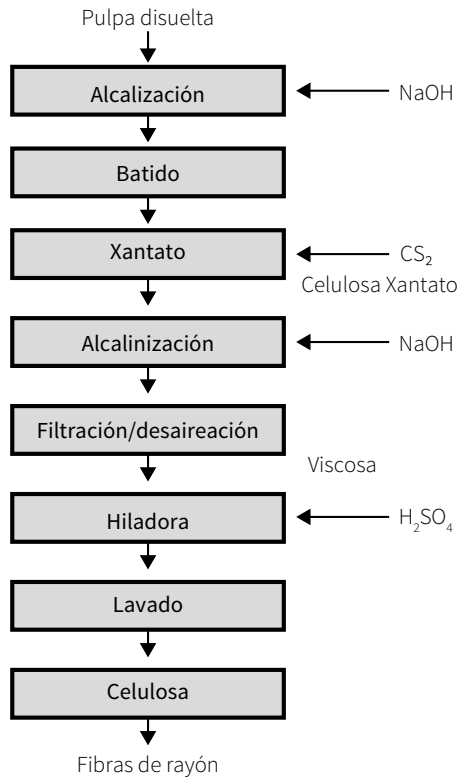


Figura 5-9. Proceso de la producción de rayón a partir de la pulpa disuelta.
Tomada y modificada de^[60]

Aunque el rayón y sus derivados son productos finales atractivos, no puede dejarse a un lado la materia prima, caracterizada por ser celulósico, teniendo los residuos provenientes del sector maderero, un gran potencial para ser empleados en esta aplicación.

Parámetros para la elección de materia prima

El rendimiento en la obtención de fibras es un factor económico decisivo, ya que el costo de la madera domina el costo total de la producción de la fibra. En consecuencia, el conocimiento de la relación entre las condiciones del proceso y el rendimiento de la pulpa es un requisito previo importante para la optimización económica de dicho proceso.

Especie de origen. Cualquier especie o sus residuos resultarían adecuados para la producción de pulpas celulósicas, dado su contenido elevado de celulosa. La influencia del tipo de especie se verá reflejada en el pretratamiento aplicado. El método prehidrólisis *kraft* no tiene restricción en cuanto a especies, por lo que es posible su aplicación para la mayoría de ellas, mientras que el método ácido sulfito está restringido para especies de los géneros *Abies*, *Picea* y *Tsuga*.^[10]

Básicamente, las especies de madera empleadas para la producción de pulpa disuelta en la elaboración de rayón-viscosa y los productos de celulosa regenerados son las mismas empleadas en la elaboración de pulpa para papel,^[69] aunque la preferencia recae sobre algunos pinos y eucaliptos.^[70]

Composición química. La composición química de cada especie determina finalmente la viabilidad del proceso; de aquella depende, además, gran parte de la economía durante su desarrollo. Aunque la decisión no dependerá de uno u otro parámetro, pues esto debe ir más a fondo, es necesario analizar la composición lignocelulósica, las interacciones que se generen entre los componentes principales y las características del proceso.^[71] Así, se prefieren aquellas especies con elevados contenidos celulósicos y bajos contenidos de compuestos no celulósicos, como hemicelulosa, lignina y compuestos extraíbles.

- **Contenido de celulosa.** La celulosa es el componente principal de la pulpa.^[10] Las especies y, por ende, los residuos se considerarán adecuados con contenidos de celulosa cercanos al 40% de la composición global.^[72] La variación en el contenido de celulosa en las pulpas dependerá en gran medida del pretratamiento aplicado: los procesos en los cuales se aplica

el método ácido sulfito (AS) permiten obtener una pulpa con contenido de celulosa de entre 90% y 92%, mientras que al aplicar prehidrólisis *kraft* se pueden obtener pulpas con contenido de entre 94% y 96%.^[10] A su vez, el contenido de celulosa en la pulpa influenciará el campo de aplicación final y los productos finales: las pulpas con contenidos de entre 90% y 92% serán destinadas preferiblemente a la elaboración de textiles como rayón-viscosa y celofán, y aquellas con contenidos finales superiores al 96%, denominadas de alta pureza, serán destinadas a la producción de productos especiales como el acetato de celulosa.^[6]

- Contenido de hemicelulosa.** La hemicelulosa es un componente estructural no deseable para el producto final, pues es causante de bajos rendimientos durante el proceso, pérdida de color de la pulpa, disminución de la filtrabilidad de la viscosa, bajos rendimientos en el proceso de xantación y pérdida de resistencia en el producto final, en el caso de los productos derivados de la viscosa o celulosa regenerada. Por lo anterior, se recomiendan contenidos inferiores al 6% en la pulpa final,^[55] aun cuando la exigencia en cuanto al contenido de hemicelulosa en pulpa variará dependiendo de la aplicación final, tal y como se aprecia en la **Tabla 5-5**. No obstante, la remoción de la hemicelulosa para llegar a las pulpas de alta calidad implica pérdida de celulosa, lo que afectaría el rendimiento global.^[54]

Tabla 5-5. Porcentaje de hemicelulosa presente en algunos productos derivados de la pulpa disuelta.

Aplicación	% P/P hemicelulosa (Xilosa, manosa)
Viscosa.	3-5
Acetato de celulosa.	1-2
Éteres con alta viscosidad.	4-6

Tomada y modificada de^[73]

Se ha identificado que el xilano¹ y el glucomanano,² componentes principales de la hemicelulosa, son posibles causantes de inconvenientes operacionales, tales como la disminución de la calidad final y bajos rendimientos en la obtención de pulpa.^[74,75] Por lo anterior, se recomienda que una pulpa disuelta apta para la producción de derivados ésteres de celulosa no contenga más del 3% de xilosa ni más del 0,5% de manosa, con el fin de asegurar la calidad de los productos finales.^[6]

- **Contenido de lignina.** En cuanto a la lignina (considerada como un contaminante en la pulpa), se espera que su contenido sea muy bajo: son aceptables trazas o contenidos menores que 0,2%.^[55] Con altos contenidos de lignina, se necesitarían mayores cargas químicas, mayores temperaturas de procesos, lo que hace el proceso más exigente.^[56] Sin embargo, la mayor parte de la lignina es eliminada en la etapa de hidrólisis y, finalmente, la lignina residual es eliminada durante el proceso de blanqueamiento de la pulpa; lo anterior tiene como fin asegurar la calidad en el producto final (garantizando propiedades como el brillo), principalmente en *Lyocell*, viscosa y acetato.^[10,55]
- **Contenido de extractivos.** Generalmente, las pulpas con alto contenido de celulosa tienen una cantidad muy baja de extraíbles, menor que 0,5% wt.^[56] Aunque la cantidad de extractivos en la madera es baja, con valores entre el 1% y el 5% para las coníferas y entre el 2% y el 8% para las latifoliadas,^[76] su composición química es variable, dados los diferentes compuestos presentes, entre los que se encuentran resinas,

- 1 El xilano es un polisacárido constituido por unidades monosacáridas de xilosa (pentosa). Se encuentra principalmente en las especies latifoliadas.
- 2 El glucomanano está compuesto, en gran parte, por D-manosa y D-glucosa, y está presente en las especies coníferas.

compuestos fenólicos, ácidos grasos.^[6] Los efectos negativos que causan las altas cantidades de extractivos durante el desarrollo de los procesos incluyen precipitaciones, obstrucción de las hileras y aparición del color amarillo en los hilos.^[15] Pese a ello, se considera que los extractivos podrían influir de manera positiva en la reactividad de la celulosa (en el caso de los derivados de celulosa modificada)^[77] y en la penetración química de compuestos álcali y disulfuro durante los procesos de obtención de viscosa.^[78]

Otros productos de interés obtenidos a partir de la pulpa disuelta

La pulpa disuelta implica procesos de producción aún más exigentes en comparación con la pulpa destinada a la fabricación de papel. Sus exigencias en cuanto a composición química (alto contenido de celulosa y bajo contenido de compuestos no celulósicos) lo demuestran. Aun así, este tipo de pulpas no se utilizan solo en la elaboración de fibras textiles, sino que muestran diversas aplicaciones; por ejemplo, en industrias alimenticias y farmacológicas, en sus procesos de refinación y modificación, tales como acetilación, nitración, esterificación y otros con diversas moléculas orgánicas e inorgánicas. La **Figura 5-10** presenta la gran variedad de productos posibles a partir de la obtención de pulpa disuelta.^[70]

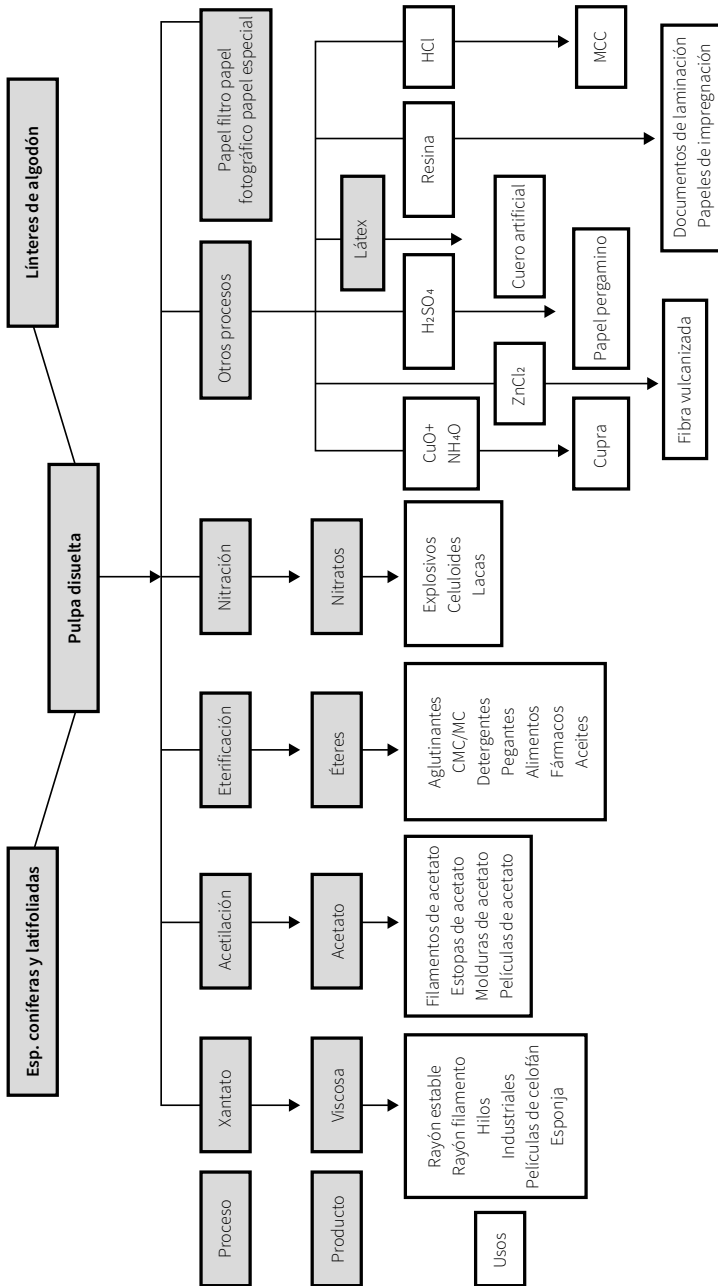


Figura 5-10. Productos obtenidos a partir de la pulpa disuelta.

Tomada y modificada de [70]

Cabe también tener en cuenta los rendimientos frente al uso de la madera. Si bien es un proceso que entrega una variedad de opciones en cuanto a productos, el hecho de que sea tan exigente en su composición celulósica genera pérdidas de material durante su desarrollo y su rendimiento disminuye en comparación con la obtención de pulpa para otros fines.

3. Obtención y aplicación de taninos

La madera es empleada principalmente para la elaboración de productos como pulpa celulósica, paneles, tableros y mobiliario. En dichas aplicaciones, la corteza es separada como un producto de desecho y usada en horticultura o como combustible. Se sabe que la corteza, la cual protege al árbol contra la agresión externa, contiene muchos compuestos químicos de alto valor, cuya extracción podría contribuir al reúso y valorización de dicho residuo y, con ello, a la economía y al ambiente.^[79,80] En este contexto, los residuos generados en la tala y en las industrias de transformación primaria de madera son fuente valiosa para la recuperación de ácidos resínicos, fitoesteroles, polifenoles o taninos, terpenos, carotenoides, flavonoides y otros compuestos^[2,4] que han sido ampliamente estudiados por su potencial aplicación en diferentes áreas, tales como alimentación, cosmetología, medicina e industria farmacéutica.^[81]

Los taninos son compuestos de alto peso molecular, presentes en la madera y en la corteza de los árboles (en esta última están en mayor cantidad en comparación con su parte interna).^[2] Los residuos de la madera son una prometedora fuente de taninos para aplicación industrial, en la que se ha venido empleando los provenientes de especies como *Pinus radiata* y *Acacia mollissima*, entre otras caracterizadas, precisamente, por su alto contenido de taninos.^[80]

Cabe resaltar que son un importante grupo de polímeros polifenólicos, producto del metabolismo secundario de las plantas, y que no cumplen funciones vitales, pero sirven para darles características y propiedades especiales, como pigmentación, protección, entre otras.^[38] Poseen la habilidad de formar complejos con diferentes moléculas presentes, como proteínas,

polisacáridos, ácidos nucleicos, esteroides, alcaloides y saponinas, y, además, desempeñan un rol importante en el crecimiento y reproducción de las plantas, así como en su resistencia a la depredación microbiana, a algunos insectos y al estrés causado por radiaciones UV y por las heridas.^[82] Asimismo, les otorgan a las plantas propiedades astringentes, lo que hace que los tejidos vegetales no sean comestibles, aunque existen varios microorganismos, así como plantas y algunos animales, que tienen sistemas con la capacidad para degradar enzimas.^[38]

Una característica importante de los taninos, y que debe tenerse en cuenta para su posterior aplicación, es que son fácilmente oxidables al entrar en contacto con el aire.^[83] Según la estructura del monómero y su estabilidad química, los taninos pueden clasificarse en dos grandes grupos:^[38]

Taninos condensados

También conocidos como proantocianidinas, son polímeros aromáticos basados en una unidad flavonoide de 15 carbonos, con un peso molecular entre 500 y 3.000,^[84] y caracterizados por una alta reactividad con aldehídos y otros reagentes.^[85] La unidad de flavonoide se encuentra compuesta por un sistema de anillos heterociclos y una estructura bien definida por un anillo A derivado de la fenilalanina y un anillo B proveniente de la biosíntesis de policetonas. En la **Figura 5-11** se puede apreciar la estructura química fundamental de los taninos, el flavonoide con sus anillos característicos.

La **Figura 5-12** presenta los taninos más estudiados derivados de la oligomerización de unidades de flavan-3-ol, como catequina o epicatequina.^[82]

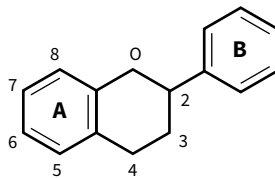


Figura 5-11. Estructura del flavonoide.

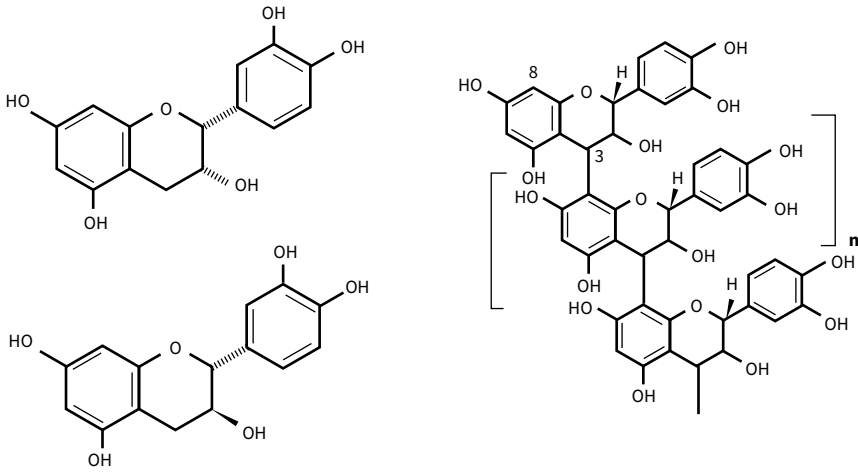


Figura 5-12. Composición de los taninos condensados.

A. Epicatequina. **B.** Catequina. **C.** Tanino condensado.

Tomada y modificada de^[80]

Los taninos condensados son los compuestos fenólicos naturales más abundantes, después de la lignina, y los flavonoides más comunes.^[82] En el comercio, los taninos condensados constituyen más del 90% de la producción anual mundial de taninos (200.000 ton/año) y están presentes principalmente en la corteza y la madera de varias especies de árboles, tales como *Acacia*, *Schinopsis*, *Tsuga*, y *Rhus*, y diferentes especies de pino.^[86] Tiene alta reactividad con los grupos aldehídos, lo que ha permitido aplicaciones basadas en su reacción con el formaldehído; por su bajo grado de polimerización, son solubles en solventes polares, lo que los hace química y económicamente más interesantes para la preparación de resinas, adhesivos y otras aplicaciones, además del cuero.^[2,80]

Taninos hidrolizables

Son ésteres que se forman entre un ácido fenólico y un azúcar; en el caso de los ácidos fenólicos, cuando la unidad fenólica es el ácido gálico, adquieren el nombre de galotaninos, mientras que cuando la unidad es el ácido

elágico, son conocidos como elagitaninos; comúnmente están unidos a la D-glucosa, aunque también pueden encontrarse otras moléculas como fructosa, xilosa y sacarosa.^[84] La **Figura 5-13** presenta la estructura química del componente tanto del ácido gálico como del ácido elágico. Existe una gran variedad de estructuras (galotaninos y elagitaninos) que se derivan de esta unión entre el ácido fenólico y el azúcar como unidad de repetición, conservando características, como lo evidencia la **Figura 5-14**.

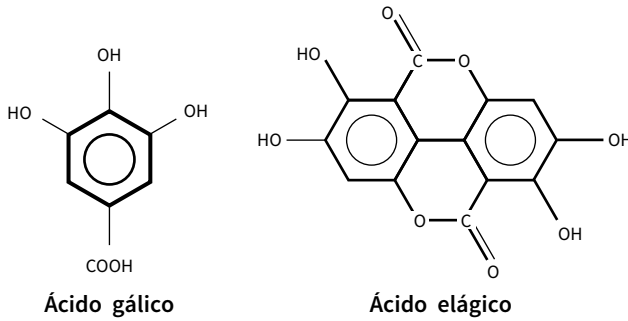


Figura 5-13. Estructuras químicas de los componentes principales de los taninos hidrolizables, ácido gálico, y ácido elágico.

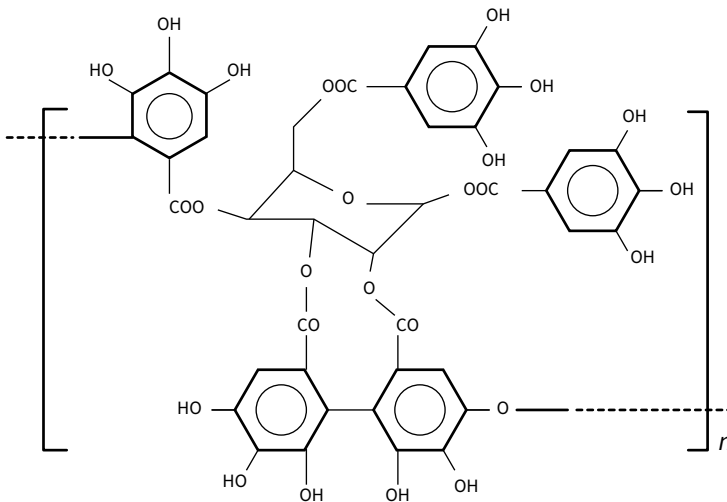


Figura 5-14. Estructura básica de un tanino hidrolizable.

El nombre “taninos hidrolizables” para los galotaninos y los elagitáninos tiene que ver con que estos compuestos pueden ser hidrolizados con facilidad en ácidos diluidos, bases o enzimas, azúcares y polialcoholes.^[2,87,88] Durante esta reacción, los hidrolizables liberan fácilmente las subunidades ácido gálico o ácido elágico, lo cual implica una diferencia radical con sus similares, los taninos condensados, que no son fácilmente hidrolizados por los compuestos anteriormente mencionados.

Los taninos hidrolizables no son adecuados para la preparación de adhesivos debido a las bajas velocidades de reacción e interacción con compuestos como formaldehído y otros aldehídos. Sin embargo, se han utilizado como sustitutos parciales del fenol (hasta un 50% de sustitución) en la fabricación de resinas de fenol-formaldehído.^[85] Como consecuencia de su falta de estructura macromolecular, de su limitada producción mundial y de su precio relativamente alto, su uso principal es el bronceado del cuero, en el cual su rendimiento, especialmente en términos de claridad de color y resistencia a la luz, es realmente excelente.^[85]

Los taninos tienen propiedades interesantes que encajan bien con el objetivo de crear productos químicos a partir de la madera. La variedad de aplicaciones incluye fabricación de cuero, aditivo en vino, cerveza y jugos, y superplastificantes de cemento, y, más recientemente, en las industrias médicas y farmacéuticas.^[4,85] Las nanopartículas poliméricas se utilizan generalmente en adhesivos, en particular como aglutinante para madera, en lo cual la reacción de condensación entre formaldehído y tanino se lleva a cabo para formar una resina termoendurecible.

De manera general, la aplicación industrial de los taninos involucra principalmente su proceso de extracción, cuyo rendimiento y concentración dependen de la fuente, tipo de solvente, tiempo de extracción, temperatura, relación líquido-sólido y preparación de la muestra.^[80] Comúnmente se emplea el agua como medio de extracción, aun cuando se puede obtener mayor eficiencia mediante el uso de solventes orgánicos, como etanol, metanol, acetona y hexano, pero se corre el riesgo de generar efectos ambientales, inflamabilidad y toxicidad.^[80]

Elaboración de adhesivos basados en taninos

Una amplia gama de adhesivos y otros sistemas de aglutinantes se utiliza en la fabricación de paneles compuestos (madera contrachapada, tableros de fibra, tableros de partícula, laminado *finger joint*, cartón corrugado) con el fin de darles resistencia, como resultado de la penetración en las hebras, fibras o partículas, y, por ende, de la distribución eficiente de las fuerzas madera-adhesivos (enlaces). La mayoría de adhesivos usados en la unión de madera son derivados de petróleo (fenol) o de gas natural (urea y formaldehído). Estos compuestos tienen significativas limitaciones: los enlaces de pegamento son menos duraderos, generan emisiones continuas durante su uso (que afectan significativamente la salud por las reacciones alérgicas que pueden desarrollarse) y son dependientes del costo del petróleo o del gas natural,^[5,89] por lo que hay un interés evidente en generar sistemas adhesivos con recursos renovables.

El crecimiento en la industria de paneles compuestos ha dependido de la producción de adhesivos con las propiedades requeridas (durabilidad y resistencia), disponibles en cantidades suficientes y a un costo adecuado.^[2,5] Su aplicación en adhesivos viene siendo desarrollada desde la década de los 50, cuando el enfoque se estableció a partir de los taninos condensados y fueron evaluadas diferentes especies maderables.^[90] En este ámbito, se evidencia un panorama prometedor en cuanto a la posibilidad de sustituir parcialmente los adhesivos actuales por adhesivos más duraderos, obtenidos mediante reacciones de policondensación de taninos con formaldehído o reacciones de copolimerización de taninos con resinas fenólicas o aminoplásticas.^[5,85]

Sin embargo, se han encontrado dificultades en la utilización de los extractos de taninos de las cortezas, principalmente debido a los bajos rendimientos de extracto, bajos valores de Stiasny, alta viscosidad, disponibilidad limitada y calidad variable de los extractos;^[2,85,90] estos inconvenientes se relacionan con métodos de extracción y procesamiento posterior de los extractos. Al igual que muchos productos naturales, la composición de los taninos varía según la especie, el hábitat y las condiciones de cultivo y crecimiento; por lo tanto, por las características variables se dificulta la elaboración de adhesivos consistentes y uniformes.^[5]

Parámetros de interés para la selección de la materia prima. Dada la complejidad de la madera como sustrato, es difícil entender por qué algunos adhesivos de madera funcionan mejor que otros, aun cuando se someten a pruebas de durabilidad más severas. Son muchos los factores que afectan el comportamiento de adhesión, y se agrupan así: características de las resinas, características de las especies maderables, proceso productivo de adhesivos y características finales del adhesivo. Esta sección centra su atención en describir los parámetros o características que deben cumplir los taninos para obtener un adhesivo de calidad, considerando la diversidad en la estructura y las propiedades físico-químicas de estos polifenoles. En general, la calidad de un adhesivo se evalúa en el proceso de extracción de los taninos, aun cuando no es concebible un protocolo de extracción universal y se deben diseñar y optimizar procesos específicos para cada fuente fenólica. Por lo anterior, se sugiere tener en cuenta los siguientes parámetros a la hora de considerar los extractivos de una especie maderable con potencial para la elaboración de adhesivos:

- **Viscosidad.** Este parámetro es importante en la formulación final del adhesivo debido a que se relaciona con el contenido de sólidos y el pH. Su control es esencial, pues durante los procedimientos de extracción de taninos se obtienen valores de viscosidad muy elevados que influyen en el producto final al afectar el flujo normal del adhesivo en su aplicación.^[61,91] Este parámetro se encuentra influenciado tanto por el contenido de sólidos como por el pH: valores altos de pH incrementan la viscosidad del extracto.^[86] Para una adecuada formulación se recomienda que la viscosidad no supere el valor de 1.500 cp, siendo 1.200 cp el valor deseable.^[92] Cuando la viscosidad de la formulación no esté en los niveles adecuados, es posible emplear diversos métodos para alcanzarlos, entre los cuales se encuentran sulfatación, disminución del pH y ultrafiltración, con el objetivo de remover sólidos insolubles presentes en el extracto.^[93]
- **Rendimiento del extracto.** Este parámetro permite conocer el potencial que tiene una especie u otra para ser utilizada como base para la elaboración de adhesivos; especies con altos rendimientos en el extracto, es decir, altas composiciones, son las que comúnmente se han

aplicado en la industria.^[94] Además, está directamente relacionado con la disponibilidad de taninos condensados en una especie; así, especies que presentan los mayores rendimientos de extracto son las que poseen mayores contenidos de taninos. Lo anterior fue estudiado por Pizzi *et al.*,^[95] cuyos resultados se muestran en la **Tabla 5-6**. Cabe destacar que estos valores dependerán de otros factores, entre estos, la especie de árbol, tamaño de partícula, solventes empleados en la extracción, tiempo de extracción; cada uno de ellos deberá ser analizado para tener valores aceptables y, ante todo, viables.^[96]

Tabla 5-6. Relación entre los parámetros rendimiento del extracto, fenoles y taninos condensados.

(g/100 g de corteza en base seca)	Rendimiento de extracción*	Fenoles totales (UV 280 nm)	Fenoles (FC)	Taninos condensados
<i>Pinus glabra.</i>	26,6	26 ± 1	4,7 ± 0,1	11
<i>Pinus halepensis.</i>	30,1	5 ± 1	7,5 ± 0,1	16,6
<i>Pseudotsuga menziesii.</i>	22,8	11 ± 1	3,6 ± 0,1	6,7
<i>Pinus pinaster.</i>	10,2	3 ± 1	0,8 ± 0,1	1,2
Eucalipto.	6,5	2 ± 1	0,2 ± 0,1	0,2

*Extracciones realizadas en solución acetona/agua (70/30).

Tomada y modificada de^[95]

- **El pH de los taninos.** El control de este parámetro es realizado en función de la reactividad de los anillos de los taninos con el formaldehído presente en las formulaciones. Se debe garantizar una alcalinidad durante la formulación, para lo cual valores cercanos a pH = 10 son empleados con el fin de asegurar que todos los anillos presentes en la molécula de taninos reaccionen con el formaldehído.^[97] Sin embargo, el pH es

un parámetro variable, que generalmente depende de la composición química y molecular de los taninos, así como de la especie de la cual provienen; de tal suerte, por ejemplo, adhesivos de taninos provenientes de pino tienen pH 8,0, mientras que taninos provenientes de mimosa y quebracho tienen pH = 10,0.^[98]

- **Contenido y reactividad de los polifenoles.** Se considera el parámetro más importante para la elaboración de los adhesivos y puede participar en reacciones de condensación con el formaldehído presente en la formulación;^[86] indica la presencia de los taninos condensados en el extracto^[99] y se ve influenciado por otro parámetro, el pH: valores alcalinos incrementan la reactividad de los taninos.^[100]

Otros parámetros que se emplean para elegir la materia prima, o la madera, son el porcentaje de taninos condensados, sólidos totales y el número de *Stiasny*. A continuación, se hace mención en sus valores permitidos y su método de cálculo.

- **El número de *Stiasny*.** Este parámetro está relacionado con la capacidad de los extractos, obtenidos a diferentes condiciones de extracción, para reaccionar con el formaldehído. Cuanto mayor sea el valor, mayor cantidad de taninos condensables estarán presentes en el extracto y más eficaz será la adhesión. Se sugiere que el número de *Stiasny* sea mayor que 65%, valor con el cual puede llegar a producirse un adhesivo de alta calidad.^[90] Su cálculo es posible mediante la siguiente ecuación matemática:

$$\text{N.º Stiasny(\%)} = \frac{\text{Peso seco del precipitado}}{\text{Peso de sólidos disueltos en 50 ml de extracto}} \times 100$$

En la **Tabla 5-7** se resumen los números *Stiasny* determinados para los extractivos de corteza de diferentes especies.

Tabla 5-7. Número Stiasny de extractos de cortezas de diferentes especies empleados para la producción de taninos.

Especies	Número de Stiasny (%)
<i>Tanzanian mimosa.</i>	92,2
<i>Quebracho.</i>	88,32
<i>Pinus pinea.</i>	78,31-83,14
<i>Pinus brutia.</i>	88,8
<i>Acacia mangium.</i>	70,1-94,2
<i>Pinus halepensis (Grecia).</i>	80,3
<i>Pinus halepensis (Algeria).</i>	78,5
<i>Pinus sylvestris.</i>	43,8
<i>Pinus pinaster.</i>	68,7
<i>Pinus radiata.</i>	56,2
<i>Pine tannis.</i>	70,77

Tomada y modificada de^[99]

- **Porcentaje de taninos condensados.** Es directamente proporcional al número de Stiasny y al extracto total. Valores superiores al 8% son considerados aptos para ser aplicados de forma industrial.^[87] El porcentaje de taninos condensados presentes en una muestra puede calcularse con la siguiente ecuación:

$$TC = \frac{NS \cdot ET}{100\%}$$

TC = Porcentaje de taninos condensados. **NS** = Número de Stiasny.

ET = Porcentaje de extracto total.

- **Sólidos totales.** Influencia de manera directa a la viscosidad, donde altas cantidades de sólidos totales, generan valores altos de viscosidad.^[86] Estos sólidos son insolubles y generalmente son procinidinas altamente polimerizadas,^[90] Para una adecuada formulación de adhesivos, se recomiendan valores cercanos al 40 % de contenido de sólidos.^[101]

Elaboración de bioadsorbentes a partir de taninos

La adsorción es la adhesión física o unión de iones y moléculas mediante una interacción química sobre la superficie del material; en el caso de los bioadsorbentes, el material sobre el cual se fijarán será de origen biológico, una matriz biológica en la que se darán interacciones entre las moléculas presentes.^[102] Su aplicación principal es la remoción de contaminantes presentes en el agua, en soluciones acuosas o efluentes industriales, muy efectiva en una etapa posterior al tratamiento.^[80] En los últimos años se han venido realizando esfuerzos en la búsqueda de biomateriales eficientes, efectivos y económicos, enfocados en los productos derivados de las actividades agrícolas e industriales, con potencial aplicación en el tratamiento de aguas residuales.^[102]

Las expectativas frente al uso de estos biomateriales es que reduzcan los impactos ambientales en comparación con sus predecesores, como el carbón activado, con menos pretratamientos antes de su uso. Además, los bioadsorbentes basados en taninos demuestran un gran potencial de selectividad para la captación de metales preciosos o tóxicos y para la remoción de contaminantes presentes en el agua.

El proceso de adsorción involucra dos participantes: adsorbente y adsorbato. Básicamente, el fenómeno de la adsorción se presenta en la superficie del material adsorbente, en el cual las moléculas que se deben retirar (adsorbato) son fijadas por medio de fuerzas físicas (interacción electrostática y fuerzas de Van der Waals) o químicas (intercambio iónico), y puede ser reversible (con desorción) o irreversible (sin desorción)^[102,103] (la **Figura 5-15** presenta un ejemplo simple de cómo se da el mecanismo de bioadsorción).^[103,104] En este contexto, los taninos, gracias a su estructura polifenólica, poseen una abundante cantidad de grupos funcionales e hidroxil, los cuales se convierten en sitios activos para interactuar con los metales pesados o elementos que se quieren retirar, formando, de esta manera, los llamados quelatos: la formación de un complejo alrededor de los iones de metales pesados.^[2,105,106]

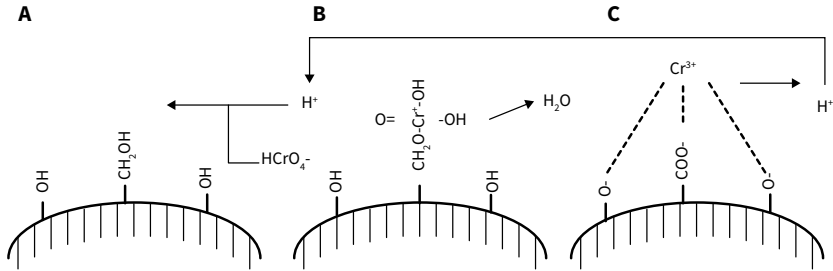


Figura 5-15. Esquema general del mecanismo de adsorción de Cr(VI) por un gel de tanino, en el cual se da el ataque al tanino **A**. Por medio de protones y del ion cromato.

B. liberación de agua. **C.** Formación del grupo carboxil con la reducción de Cr + 4 a Cr + 3 por la oxidación del tanino.

Tomada y modificada de^[80]

Este proceso, como involucra una matriz biológica, se ve favorecido en el sentido de que disminuye su exigencia en cuanto parámetros de operación, permitiendo amplios rangos de pH, entre 3 y 9, de temperatura, entre 4 y 90 °C, y de tamaño de partícula, entre 1 mm y 2 mm, con lo que se garantiza que el equilibrio de estado de ambos procesos, adsorción y desorción, sea llevado a cabo rápidamente. Como consecuencia de ello, se obtienen alta eficiencia, mínimos requerimientos de nutrientes adicionales, bajas inversiones de capital y bajos costos operacionales.^[102]

Una de las grandes dificultades que presentan los taninos al ser empleados como bioadsorbentes son, sin duda, su polaridad y su facilidad de extracción mediante agua, la cual juega dos papeles: por un lado, uno positivo debido al impacto sobre la economía del proceso por sus bajas exigencias en cuanto a métodos de extracción se refiere; pero, por el otro, pueden ser fácilmente lixiviados durante su aplicación en la recuperación de metales, lo que afecta su desarrollo eficiente dada su alta solubilidad en agua.^[107] Para contrarrestar este efecto, se ha avanzado en el uso de varias técnicas de inmovilización de taninos en matrices insolubles en agua, con diferentes rendimientos bajo condiciones un tanto similares; el resultado son los productos conocidos como adsorbentes basados en taninos, o TBA por sus siglas en inglés (*tannin based adsorbents*). Algunas de esas técnicas para inmovilizar se nombran a continuación:^[80]

Taninos en geles o resinas. Conocidos también como taningeles, su producción se da a partir de los taninos condensados; ya extraídos los taninos, son diluidos y homogenizados en una mezcla de hidróxido de sodio (NaOH) y agua destilada; a continuación, se someten a la polimerización empleando un aldehído, comúnmente el formaldehído; este proceso tiene como objetivo formar el gel en una temperatura cercana a los 80 °C y un tiempo que oscila entre ocho y 12 horas. Luego viene un lavado (en algunos casos se emplea ácido nítrico), un secado y un filtrado, que determinará el tamaño de partícula adecuado para el proceso de recuperación de metales o contaminantes.^[80] En la **Figura 5-16** se presenta un acercamiento a las reacciones ocurridas durante la formación del taningel.

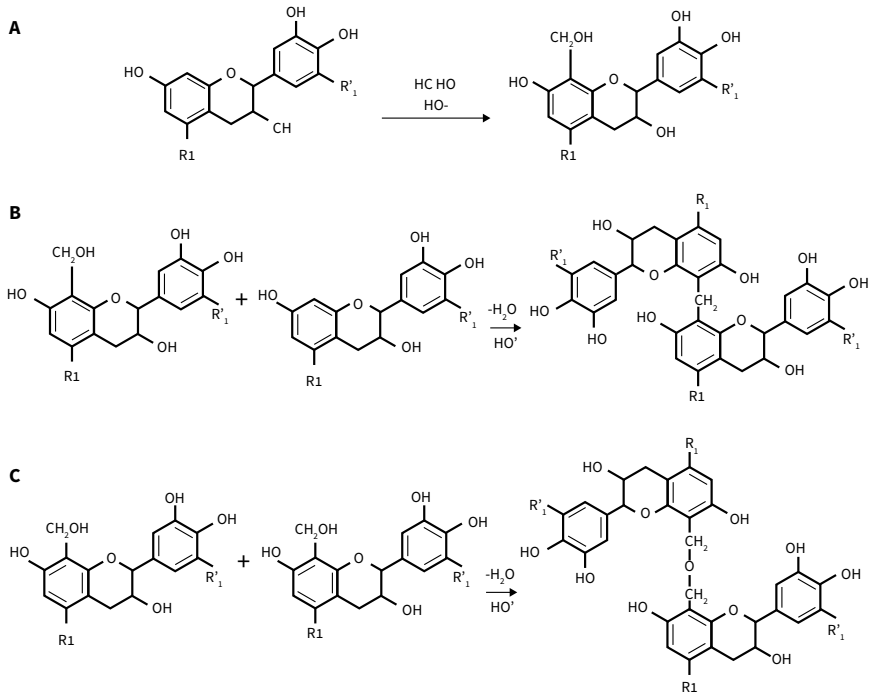


Figura 5-16. Acercamiento al mecanismo de gelificación de un tanino con formaldehído.

A. Hidroximetilación. **B.** Inmovilización por puente de metileno.

C. Inmovilización por puente metilén-éter.

Taninos inmovilizados. En este método, los taninos son inmovilizados en fibras de polímeros naturales aprovechando sus estructuras tridimensionales, polímeros como el colágeno y la celulosa, creando así una matriz insoluble en agua.^[108] Esta técnica se basa en la afinidad que presentan los taninos en procesos como la curtumbre y en su relación con las pieles y las fibras de colágeno presentes.^[109] Su elaboración involucra los pasos de extracción de los taninos, seguidos por la preparación de las fibras que se emplearán como matriz, a las cuales debe eliminárseles los contenidos no solubles y otros contaminantes. En algunas ocasiones se agregan aditivos para incrementar su reactividad y, finalmente, cuando se tienen libres, se someten a la reacción con los taninos y se obtiene la matriz, en la cual, debido a características como estructura, peso molecular y tamaño de partícula, los taninos se comportarán de manera diferente en el complejo tanino-polímero.^[110]

Espumas de taninos. Requiere la mayor cantidad de reactivos entre los tres métodos. Se preparan a partir de una mezcla de diferentes compuestos, tales como furfural alcohol, agua destilada, formaldehído, aditivos surfactantes y plastificantes, y obviamente taninos. Estos compuestos son una forma de variación en la búsqueda de la viabilidad del proceso. Este inicia con la polimerización de los taninos con el formaldehído y la autocondensación del furfural alcohol, lo que genera una resina sólida. Cada uno de los reactivos juega un rol específico; la adición del agente surfactante facilita la formación de la espuma y disminuye la temperatura interna, mientras que el agente plastificante mejora la elasticidad de la espuma;^[111] luego, la mezcla es sometida al curado, en reposo, y, finalmente, cortada según las dimensiones necesarias.^[112]

Los taninos destinados como adsorbentes no requieren un alto grado de pureza y no son necesarios procesos complejos de extracción. La presencia de otros compuestos fenólicos puede mejorar sus capacidades adsorbentes.^[80] Entre los agentes contaminantes que han podido ser removidos por los adsorbentes basados en taninos provenientes de especies forestales se encuentran los iones de metales pesados: Cr (III), Pb (II), Hg (II), Cd (II) y Au (II), de efluentes industriales;^[105] además, hay que mencionar la remoción de otros contaminantes, como el azul de metileno, en aguas industriales

provenientes de procesos textiles como los propios de las tintorerías y la remoción de bromuro de hexadeciltrimetilamonio (CTAB) y de sales de amonio cuaternario con actividad detergente.^[113] También se han desarrollado patentes como la de Shirato *et al.*, asignada a la empresa Mitsubishi Nuclear Fuel Company Ltd., en la cual se describe el procedimiento para separar metales pesados como actínidos, cadmio, mercurio, iones, con posible desorción, aplicando cambios en el pH de la solución y estableciendo un método de regeneración del adsorbente.^[114] En la **Tabla 5-8** se reporta el uso de algunos taninos, con su fuente de obtención y los metales removidos durante su empleo para dar una idea de la capacidad de este tipo de adsorbentes en la remoción de metales tóxicos y preciosos.

Tabla 5-8. Diferentes adsorbentes relacionados con su respectivo adsorbato y su capacidad de adsorción de diferentes contaminantes y metales.

Adsorbente	Adsorbato	Q _m (mmol g ⁻¹)
Gel de taninos condensados.	Cr (VI)	5,52
Taningel de persimon.	Cr (VI)	5,27
Taningel de acacia negra.	Cr (VI)	9,39
Taninresina de quebracho.	Pb (II)	0,42
Taningel de mimosa.	Cu (II)	0,69
Taningel de pino.	Zn (II)	1,0
Tanino inmovilizado en fibras de colágeno.	Hg (II)	0,99
Taningel de pino.	B	1,05
Taningel de pino.	Azul de metileno.	1,56
Taningel de ciprés.	Trimetropina.	1,28
Espuma de tanino.	Trimetropina.	0,07
Taningel.	Reactivo rojo 2	0,07

Tomado y modificado de^[80]

Parámetros importantes en la producción de bioadsorbentes. Diferentes factores se han considerado influyentes en el proceso de bioadsorción: las propiedades físico-químicas de los iones metálicos (es decir, peso molecular,

radio iónico, estado de oxidación), propiedades del biosorbente (en especial, la estructura de la superficie de la biomasa) y diferentes parámetros del proceso (pH, temperatura, concentración de biosorbente, concentración de sorbato). El pH es uno de los factores clave e influye no solo en la disociación de los sitios, la química de la disolución de los iones metálicos, la hidrólisis, las reacciones redox y la precipitación, sino también en la especiación y la afinidad a la biosorción de iones metálicos.

Estudios previos han demostrado que los residuos de especies forestales, especialmente aserrín o polvo de madera, pueden ser potencialmente utilizados como adsorbentes para tratamiento de aguas contaminadas con metales pesados. En este caso se estudiará la viabilidad de algunas especies maderables para ser usadas como bioadsorbentes, con base en una caracterización físico-química preliminar y en el conocimiento de su capacidad de adsorción.

- **Tipo de especie.** Se han encontrado diferencias entre la capacidad de adsorción en relación con las clasificaciones de las especies. Ha habido mejores resultados con las especies latifoliadas, aunque presentan el inconveniente de decolorar el agua debido a la presencia de materia orgánica y componentes extractivos, los cuales tendrán que ser, precisamente, extraídos durante el proceso de obtención del tanino.^[115] Esta característica está relacionada con la composición estructural de los taninos y las diferencias entre las especies (por ejemplo, los taninos predominantes extraídos de la corteza de *Acacia mearnsii*) están compuestas por un anillo A de resorcinol y un anillo B de pirogalol, mientras que los anillos A de los taninos provenientes del pino se caracterizan por ser del tipo floroglucinol, mucho más reactivo que los anillos tipo resorcinol.^[113]
- **Extracción de taninos.** Como se mencionó, los taninos están presentes en la madera y en la corteza de las plantas, y, por ende, en los residuos. Su proceso de extracción y conceptos para el desarrollo de bioadsorbentes

no difieren de los empleados para la elaboración de adhesivos; esta última es posible empleando solventes como el agua, el más común en la industria.^[112] Cabe recordar que los rendimientos y la concentración de los taninos durante los diferentes procesos de extracción dependerán de diversos parámetros: especie de madera, tipo de solvente empleado en la extracción, tiempo del proceso, temperatura, relación líquido-sólido y preparación de la muestra.^[80] Una buena base para la extracción de aquellos es identificar previamente el contenido tánico de las especies. La **Tabla 5-9** presenta un listado de especies maderables que han sido evaluadas respecto a su contenido de taninos, tanto en la corteza como en su parte interna.

Tabla 5-9. Especies empleadas y con aplicación industrial en el mundo de acuerdo con su composición de taninos.

Parte usada	Nombre vulgar	Nombre científico	Contenido tánico medio (%)	Procedencia
Madera	Castaño.	<i>Castanea sativa.</i>	6,8-10	Europa y Estados Unidos.
	Catecú.	<i>Acacia catechu.</i>	35-55	India y Birmania.
	Myrtan.	<i>Eucalyptus wandoo.</i>	10	Australia.
	Quebracho.	<i>Schinopsis balansae.</i>	18-22	Argentina, Paraguay y Bolivia.
		<i>Schinopsis heterophylla.</i>		
<i>Schinopsis lorentzii.</i>				

Continúa en la siguiente página.

Continuación de la Tabla 5-9.

Parte usada	Nombre vulgar	Nombre científico	Contenido tánico medio (%)	Procedencia
Madera	Tizara.	<i>Rhus pentapHylla.</i>	17-23	Marruecos, Argelia y Túnez.
	Urunday.	<i>Astronium balansae.</i>	11-16	América del Sur.
	Abeto.	<i>Abies pectinata.</i>	11,5	Alemania, Francia, Italia, etc.
	Abedul.	<i>Betula verrucosa.</i>	8	Europa, Asia y América del Norte.
	Babul.	<i>Acacia arábica.</i>	14	India.
	Acacia.	<i>Acacia dealbata.</i>	20	Australia.
		<i>Acacia decurrens.</i>	37	
		<i>Acacia pycnantha.</i>	41	
	Alcornoque.	<i>Quercus suber.</i>	8,1-16,6	España, Portugal, Argelia, etc.
	Aliso.	<i>Alnus glutinosa.</i>	8-13,5	Europa y América del Norte.
	Camachile.	<i>Pithecolobium dulce.</i>	25	India, Filipinas y México.
Casia.	<i>Cassia auriculata.</i>	15-18	India.	
	<i>Cassia fitula.</i>	11		
Corteza	Encina.	<i>Quercus ilex.</i>	15-17	Mediterráneo.
	Maleto.	<i>Eucalyptus astringens.</i>	40-57	Australia.
	Mangle.	<i>Rhizophora mangle.</i>	35	África y América (zonas pantanosas).
	Mimosa.	<i>Acacia mollisimas.</i>	35	África, Australia, Brasil, etc.
	Myrtan.	<i>Eucalyptus wandoo.</i>	20	Asia, Australia.
	Pinos.	<i>Pinus halapensis.</i>	14,7	Europa, África y Asia.

Continúa en la siguiente página.

Continuación de la Tabla 5-9.

Parte usada	Nombre vulgar	Nombre científico	Contenido tánico medio (%)	Procedencia
Corteza	Roble.	<i>Pinus radiata.</i>	17-18	España.
		<i>Quercus pedunculata.</i>	6-16	Europa.
		<i>Quercus sessiliflora.</i>		
	Hemlock.	<i>Tsuga canadensis.</i>	10-11	Estados Unidos y Canadá.
	Castañola.	<i>Terminalia cattapa.</i>	23	Brasil.
	Pashaco.	<i>Schzolobium</i> sp.	9,8-10,8	Perú.
	Badan.	<i>Bergeniam crassifolia.</i>	16	Rusia, Alemania, etc.
Gambier.	<i>Nauclea gambier.</i>	40	Indochina.	

Tomada y modificada de^[94]

- Rendimiento del extracto.** Se buscan especies con altos contenidos, que pueden ser extraídos con diferentes métodos y empleando solventes orgánicos, agua y soluciones de NaOH; hay que tener cuidado con fenómenos como la oxidación, que puede llegar a disminuir la reactividad de los taninos.^[80]
- El pH.** La capacidad de absorción del tanino dependerá, en gran parte, del pH de la solución y de los metales pesados que se encuentren allí; es por ello que se ve la necesidad de ajustar el pH de tal manera que puedan adsorberse uno o más elementos metálicos presentes; por ejemplo, cuando hay una solución que contiene uranio, neptunio, americio y curio, y se quiere separarlos, el pH primero se ajusta en un rango entre 6 a 10, con el objetivo de adsorber el uranio y el neptunio, mientras que para la adsorción de los elementos restantes, americio y curio, el pH se ajusta en un rango de 3 a 6.^[114] Otro claro ejemplo de la influencia de este parámetro fue evidenciado durante la recuperación de cobre en una solución acuosa empleando un taningel proveniente de mimosa, en el cual hubo un incremento notable de la capacidad de adsorción a un pH 4,0 frente

a cuando el proceso fue realizado a un pH 2,0; esto puede deberse a una disociación ácida de los grupos hidroxilos presentes en los anillos fenólicos del tanino.^[107] Siendo así que el pH de la solución variará según los metales o elementos presentes, lo que justifica la necesidad de ajustarlo en busca de la máxima capacidad de adsorción.

- **Características estructurales.** Los grupos hidroxilos que rodean los anillos fenólicos facilitan la remoción de metales pesados presentes en la solución debido a su alta afinidad y capacidad de reacción.^[116] Otra característica para resaltar es la presencia de anillos A, los cuales, debido a su alta nucleofilidad, facilitan la reactividad con el formaldehído, lo que favorece el proceso de inmovilización hacia la creación del polímero insoluble en agua; mientras que los anillos B otorgan al tanino la capacidad antioxidante y sitios para reaccionar con los metales,^[117] siendo estos sitios hidroxilos de interés en la fijación de los metales; una alta composición de los anillos B incrementaría la eficiencia del proceso, siendo necesario el uso de técnicas de espectroscopia para su caracterización,^[118] pues la distribución de los anillos A y B en los taninos dependerá del tipo de tanino o de su fuente de extracción, por cuanto diferencias entre las especies de las cuales han sido obtenida esta variabilidad dificultan una predicción exacta del tiempo de gelificación.^[119]
- **Área y porosidad.** Estos parámetros son tenidos en cuenta en el momento en que está definido el adsorbente, bien sea como un gel, bien sea como una espuma o inmovilizados en polímeros. En relación con el área superficial, que es tenida en cuenta en el desarrollo de geles, no es de vital importancia a la hora de definir la capacidad de adsorción, pues tienen más relevancia la reactividad y las interacciones que se desarrollen debido a su estructura y grupos funcionales. El área superficial, entonces, puede ser comparada con el área típica de los carbones activados, la cual se encuentra entre 200 y 1.500 m²/g;^[106] hay que destacar que las áreas superficiales que se obtienen en el desarrollo de taninos en geles son comúnmente muy bajas en comparación con otros adsorbentes, como el mencionado carbón activado: algunas tienen menos de 1 m²/g y otras no superan los 50 m²/g.^[110,113] Otra relación existente, que involucra el área superficial, es claramente su comportamiento

frente al tamaño de partícula: al incrementar el área superficial y disminuir el tamaño de partícula, se genera un aumento en la capacidad de saturación del adsorbente; aunque esto, en algunos estudios, no ha tenido una influencia significativa en la capacidad de adsorción final.^[107]

En cuanto a la porosidad, y teniendo en cuenta la clasificación de los poros (los microporos tienen un diámetro menor que 2 nm, los mesoporos un diámetro entre 2 y 50 nm y los macroporos un diámetro superior a 50 nm), se recomienda, para la elaboración de los bioadsorbentes de taninos, que en su estructura contengan una mayor proporción de mesoporos,^[113] en especial para aquellos que serán empleados en procesos de fase líquida, pues esto facilitará la adsorción de los metales debido al gran tamaño de las moléculas encontradas en esta fase.^[118]

Referencias bibliográficas

1. K. Rehman Hakeem, M. Jawaid y U. Rashid, "Biomass and bioenergy applications", Springer International Publishing, 2014.
2. R. Rowell, "Handbook of wood chemistry and wood composites". Estados Unidos: Taylor & Francis Group, 2005.
3. P. Bajpai, "Biorefinery in the pulp and paper industry", Elsevier, 2013.
4. J. Clark y F. Deswarte, "Introduction to chemicals from biomass", segunda edición, Reino Unido, Wiley, 2015.
5. J. C. F. Walker, "Primary wood processing, principles and practice", segunda edición, Netherlands, Springer, 2006.
6. P. Bajpai, "Biotechnology for pulp and paper processing", Boston, MA: Springer US, 2012.
7. P. Bajpai, "Environmentally friendly production of pulp and paper", Hoboken, NJ, Estados Unidos: John Wiley & Sons, Inc., 2010.
8. M. Akhtar, G. M. Scott, R. E. Swaney y T. K. Kirk, "Overview of biomechanical and biochemical pulping research", American Chemical Society, pp. 15-26, 1998.
9. G. B. Harpole, G. F. Leatham y G. C. Myers, "Economic Assessment of biomechanical pulping", Proceedings of the international mechanical pulping conference 1989, mechanical pulp responding to end product demands, vol. 2, pp. 398-408, 1989.
10. H. Sixta, "Handbook of pulp", vol. 1. Weinheim: Wiley-VCH, 2006.

11. T. K. Das y C. Houtman, “Evaluating chemical, mechanical, and bio-pulping processes and their sustainability characterization using life-cycle assessment”, *Environ. Prog.*, vol. 23, n.º 4, pp. 347-357, 2004.
12. A. Ferraz, A. Guerra, R. T. Mendonça y P. C. Pavan, “Biomechanical pulping of Eucalyptus wood chips”, vol. 33, n.º 2, pp. 81-87, 2012.
13. R. A. Blanchette, T. Burnes, G. F. Leatham y M. J. Effland, “Selection of white-rot fungi for biopulping”, *Biomass*, vol. 15, n.º 2, pp. 93-101, 1988.
14. C. Sánchez, “Lignocellulosic residues : biodegradation and bioconversion by fungi”, *Biotechnol. Adv.*, vol. 27, n.º 2, pp. 185-194, 2009.
15. G. Gellerstedt y G. Henriksson, “Wood chemistry and biotechnology”, *Pulp and Paper Chemistry and Technology*, vol. 1, p. 320, 2009.
16. L. Mardones, J. L. Gomide, J. Freer, A. Ferraz y J. Rodríguez, “Kraft pulping of *Eucalyptus nitens* wood chips biotreated by *Ceriporiopsis subvermispora*”, *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, vol. 81, n.º 4, pp. 608-613, 2006.
17. S. Koray Gulsoy y H. Eroglu, “Biokraft pulping of european black pine with *Ceriporiopsis subvermispora*”, *Int. Biodeterior. Biodegradation*, vol. 65, n.º 4, pp. 644-648, 2011.
18. A. Ferraz, J. Rodríguez, J. Freer y J. Baeza, “Biodegradation of *Pinus radiata* softwood by white and brown-rot fungi”, *World J. Microbiol. Biotechnol.*, vol. 17, pp. 31-34, 2001.
19. G. M. Scott, M. Akhtar, R. E. Swaney y C. J. Houtman, “Recent developments in biopulping technology at Madison, WI”, *Biotechnol. Pulp Pap. Ind.*, pp. 61-71, 2002.
20. K. Y. Kang, J. S. Sung y D. Y. Kim, “Evaluation of White rot fungi for biopulping of wood”, *Mycobiology*, vol. 35, n.º 4, pp. 205-209, 2007.
21. M. Dashtban, H. Schraft, T. A. Syed y W. Qin, “Fungal biodegradation and enzymatic modification of lignin”, *Int. J. Biochem. Mol. Biol.*, vol. 1, n.º 1, pp. 36-50, 2010.
22. Á. T. Martínez, M. Speranza, F. J. Ruiz-dueñas, P. Ferreira, S. Camarero, F. Guillén, M. J. Martínez, A. Gutiérrez y J. C. Río, “Biodegradation of lignocellulosics: microbial, chemical, and enzymatic aspects of the fungal attack of lignin”, *Int. Microbiol.*, vol. 8, pp. 195-204, 2005.
23. A. Ferraz, J. Baeza, J. Rodríguez y J. Freer, “Estimating the chemical composition of biodegraded pine and eucalyptus wood by DRIFT spectroscopy and multivariate analysis”, *Bioresour. Technol.*, vol. 74, n.º 3, pp. 201-212, 2000.
24. M. C. Inalbon, P. Mocchiutti, M. A. Zanuttini, *et al.* “Applying ligninolytic fungi on *Eucalyptus grandis* wood for pulping pretreatment or fractionation”, *Procedia Mater. Sci.*, vol. 8, pp. 1099-1107, 2015.

25. A. Ferraz, A. M. Córdova y A. Machuca, "Wood degradation and enzyme production by *Ceriporiopsis subvermispora* during solid-state fermentation of *Eucalyptus grandis*", *Enzyme Microb. Technol.*, vol. 32, pp. 59-65, 2003.
26. A. Ferraz, R. Mendonça y F. T. Da Silva, "Organosolv delignification of White and brown rotted *Eucalyptus grandis* hardwood", *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, vol. 75, n.º 1, pp. 18-24, 2000.
27. R. D. Yadav, S. Chaudhry y S. Dihman, "Biopulping and its potential to reduce effluent loads from bleaching of hardwood kraft pulp", *BioResources*, vol. 5, n.º 1, pp. 159-171, 2010.
28. E. Rasooly, H. Resalati, P. Fardim, *et al.* "Bioresource technology the effects of fungi pre-treatment of poplar chips on the kraft fiber properties", *Bioresour. Technol.*, vol. 102, pp. 4165-4170, 2011.
29. M. I. Fonseca, J. I. Fariña, M. L. Castrillo, *et al.* "Biopulping of wood chips with *phlebia brevispora* BAFC 633 reduces lignin content and improves pulp quality", *Int. Biodeterior. Biodegrad.*, vol. 90, pp. 29-35, 2014.
30. C. J. Behrendt y R. a. Blanchette, "Biological processing of pine logs for pulp and paper production with *Phlebiopsis gigantea*", *Appl. Environ. Microbiol.*, vol. 63, n.º 5, pp. 1995-2000, 1997.
31. A. K. Gangwar, N. T. Prakash y R. Prakash, "Applicability of Microbial Xylanases in paper pulp bleaching: a Review", *BioResources*, vol. 9, n.º 2, pp. 3733-3754, 2014.
32. K. E. L. Eriksson, "Biotechnology in the pulp and paper industry: an overview", vol. 57, pp. 2-14, 1998.
33. J. C. Tamarit, "Determinación de los índices de calidad de pulpa para papel de 132 maderas latifoliadas", *Madera y Bosques*, vol. 2, n.º 2, pp. 29-41, 1996.
34. R. Takeuchi, I. Wahyudi, H. Aiso, *et al.* "Wood properties related to pulp and paper quality in two Macaranga species naturally regenerated in secondary forests, Central Kalimantan, Indonesia", *Tropics*, vol. 25, n.º 3, pp. 107-115, 2016.
35. C. Foelkel, "Papermaking properties of Eucalyptus trees, woods and pulp fibers", *Eucalyptus Online Book & Newsletter*, pp. 1-110, 2009.
36. C. J. Biermann, "Handbook of pulping and Papermaking", segunda edición, Elsevier, 1996.
37. K. G. Ramawat y M. R. Ahuja, "Fiber plants biology, biotechnology and applications", Springer Science & Business Media B. V., 2016.
38. G. Gellerstedt, M. y G. Henriksson, "Wood chemistry and wood biotechnology", vol. 1, Berlín, Nueva York: Walter de Gruyter, 2009.

39. M. A. Azeez, J. E. Andrew y B. B. Sithole, “A preliminary investigation of Nigerian Gmelina arborea and *Bambusa vulgaris* for pulp and paper production”, *Maderas. Cienc. y Tecnol.*, vol. 18, n.º 1, pp. 65-78, 2016.
40. A. Da Silva, J. L. Colodette, A. de F. Gomes Gouvêa, *et al.* “Eucalyptus wood quality and its impact on kraft pulp production and use”, *Tappi Journal*, pp. 32-39, 2009.
41. C. M. Saavedra, “Determinación de peso específico y de algunas propiedades biométricas en *Eucalyptus globulus* (labill) como materia prima”, Universidad de Chile, 2004.
42. M. D. C. Arantes, P. F. Trugilho, J. R. M. Da Silva y C. R. Andrade, “Características do carvão de um clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake”, *CERNE*, vol. 19, n.º 3, pp. 423-431, 2013.
43. Confederation of paper industries, “Trees used in papermaking”, pp. 1-3, 2008.
44. K. Saijonkari-Pahkala, “Non-wood plants as raw material for pulp and paper”, *Agric. Food Sci. Finl.*, vol. 10, p. 101, 2001.
45. Confederation of European Paper Industries (CEPI), “Pulping properties of hardwoods and softwood”. [En línea]. Disponible: <http://www.cepi.org/node/22335>
46. J. Fiserova y M., Gigac, “Comparison of hardwood kraft pulp fibre characteristics and tensile strength”, *Cellul. Chem. Technol.*, vol. 45, n.º 9-10, pp. 627-631, 2011.
47. A. S. Noah, M. B. Ogunleye, J. K. Abiola y F. N. Nnate, “Fibre characterisation of *Gerdenia Ternifolia* (Linn C.) schumach for its pulping potential”, *Am. Sci. Res. J. Eng. Technol. Sci. ASRJETS*, vol. 14, n.º 2, pp. 322-332, 2015.
48. R. M. Kozłowski, “Handbook of natural fibres”, vol 2, Woodhead Publishing Limited, 2012.
49. H. V. Sreenivasa Murthy, “Introduction to textile fibres”, Nueva Delhi: Taylor & Francis Group, 2016.
50. M. M. Houck, “Identification of Textile Fibers”, Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2009.
51. R. R. Mather y R. H. Wardman, “The chemistry of textile fibres”, segunda edición, Cambridge: The Royal Society of Chemistry, 2015.
52. C. J. Luo, S. D. Stoyanov, E. Stride, *et al.* “Electrospinning versus fibre production methods: from specifics to technological convergence”, *Chem. Soc. Rev.*, vol. 41, n.º 13, pp. 4708-35, 2012.
53. C. Wu, S. Zhou, R. Li, D. Wang y C. Zhao, “Reactivity improvement of bamboo dissolving pulp by xylanase modification”, *BioResources*, vol. 10, n.º 3, pp. 4970-4977, 2015.
54. H. Sixta, M. Iakovlev, L. Testova, *et al.* “Novel concepts of dissolving pulp production”, *Cellulose*, vol. 20, n.º 4, pp. 1547-1561, 2013.

55. C. Chen, C. Duan, J. Li, *et al.* "Cellulose (dissolving pulp) manufacturing processes and properties: a mini-review", *BioResources*, vol. 11, n.º 2, pp. 5553-5564, 2016.
56. S. Cao, X. Ma, L. Lin, *et al.* "Morphological and chemical characterization of green bamboo (*dendrocalamopsis oldhami* (Munro) Keng f.) for dissolving pulp production", *BioResources*, vol. 9, n.º 3, pp. 4528-4539, 2014.
57. H. Eriksson, "Cellulose reactivity-difference between sulfite and PHK dissolving pulps", Umeå University, p. 57, 2014.
58. E. Sjostrom, "Wood chemistry, fundamentals and applications", segunda edición, vol. 2. Espoo, Finlandia: Harcourt Brace Jovanovich, 1993.
59. Y. H. P. Zhang, "Sustainable production of fuels, Cchemicals, and fibers from forest biomass", vol. 1067. Washington D. C.: American Chemical Society, 2011.
60. A. Kumar Dua, "Textile learner", An overview of viscose rayon fiber. [En línea]. Disponible: <http://textilelearner.blogspot.com/2013/06/viscose-rayon-manufacturing-process.html>.
61. P. Strunk, "Characterization of cellulose pulps and the influence of their properties on the process and production of viscose and cellulose ethers", Umeå University, p. 82, 2012.
62. P. Bajpai, "Biotechnology for pulp and paper processing". Boston, MA: Springer US, 2011.
63. B. L. P. Christov, M. Akhtar y B. a Prior, "Impact of xylanase and fungal pretreatment on alkali solubility and brightness of dissolving pulp", *Holzforschung*, vol. 50, n.º 6, pp. 579-582, 1996.
64. P. Bajpai, "Application of enzymes in the pulp and paper industry", *Biotechnol. Prog.*, vol. 15, n.º 2, pp. 147-157, 1999.
65. S. D. Mansfield y A. R. Esteghlalian, "Applications of enzymes to lignocellulosics", vol. 855, Washington D. C.: American Chemical Society, 2003.
66. R. a. Zabel y J. J. Morrell, "Wood microbiology: decay and Its prevention", Londres: Harcourt Brace Jovanovich, 2012.
67. G. M. Gübitz, T. Lischnig, D. Stebbing y J. N. Saddler, "Enzymatic removal of hemicellulose from dissolving pulps", *Biotechnol. Lett.*, vol. 19, n.º 5, pp. 491-495, 1997.
68. J. W. S. Hearle y A. Johnson, "Platinum alloys in the production of viscose rayon", *Platin. Met. Rev*, vol. 5, n.º 1, pp. 2-8, 1961.
69. M. Wayman, "Guide for planning pulp and paper enterprises". Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 1973.
70. N. Wistara y W. K. Haroen, "Rayon filament properties from five lesser known tropical woods species", *J. Agroindustrial Technol.*, vol. 18, n.º 2, pp. 94-98, 1989.

71. Y. Liu, L. Shi, D. Cheng y Z. He, “Dissolving pulp market and technologies: Chinese prospective - a mini-review”, *BioResources*, vol. 11, n.º 3, pp. 7902-7916, 2016.
72. H. P. S. A. Khalil, M. S. Alwani y A. K. M. Omar, “Chemical composition, anatomy, lignin distribution, and cell wall structure of Malaysian plant waste fibers”, *BioResources*, vol. 1, pp. 220-232, 2006.
73. H. Sixta, “Cellulose chemistry dissolving pulps”, *Aalto University School of Chemical Technology*, p. 64, 2016.
74. H. Li, A. Saeed, M. S. Jahan, Y. Ni y A. van Heiningen, “Hemicellulose removal from hardwood chips in the pre-hydrolysis step of the kraft-based dissolving pulp production process”, *J. Wood Chem. Technol.*, vol. 30, n.º 1, pp. 48-60, 2010.
75. H. Chen, “Biological fundamentals for the biotechnology of lignocellulose”, *Biotechnology of Lignocellulose: Theory and Practice*, Springer Netherlands, pp. 73-141, 2014.
76. P. Zugenmaier, “Crystalline cellulose and derivatives”, primera edición, Berlín, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008.
77. K. E. Christoffersson, “Dissolving pulp: multivariate characterisation and analysis of reactivity and spectroscopic properties”, Umeå University, 2005.
78. C. Duan, J. Li, X. Ma, *et al.* “Comparison of acid sulfite (AS)- and prehydrolysis kraft (PHK)-based dissolving pulps”, *Cellulose*, vol. 22, n.º 6, pp. 4017-4026, 2015.
79. M. Dedrie, N. Jacquet, P. L. Bombeck, *et al.* “Oak barks as raw materials for the extraction of polyphenols for the chemical and pharmaceutical sectors: a regional case study”, *Ind. Crops Prod.*, vol. 70, pp. 316-321, 2015.
80. H. A. M. Bacelo, S. C. R. Santos y C. M. S. Botelho, “Tannin-based biosorbents for environmental applications-a review”, *Chem. Eng. J.*, vol. 303, pp. 575-587, 2016.
81. A. Aires, R. Carvalho y M. J. Saavedra, “Valorization of solid wastes from chestnut industry processing: extraction and optimization of polyphenols, tannins and ellagitannins and its potential for adhesives, cosmetic and pharmaceutical industry”, *Waste Manag.*, vol. 48, pp. 457-464, 2016.
82. I. Ky, A. Le Floch, L. Zeng, *et al.* “Tannins”, in *Encyclopedia of Food and Health*, Elsevier Ltd., pp. 247-255, 2016.
83. J. Santos, “Formulación y caracterización de adhesivos para tableros de madera empleando taninos de la cáscara de castaña y de la corteza de eucalipto”, *Universidad de Santiago de Compostela*, 2013.
84. A. E. Hagerman, “Tannin chemistry”, *Department of Chemistry and Biochemistry*, Miami University, Oxford, 2002.

85. M. Naceur Belgacem y A. Gandini, Monomers, “Polymers and composites”, primera edición, Ámsterdam: Elsevier Ltd, 2008.
86. A. Pizzi y K. L. Mittal, “Handbook of adhesive technology”, segunda edición, Taylor & Francis Group, 2003.
87. C. Álvarez y O. Lock, “Taninos”, Rev. Química, vol. 6, n.º 1, pp. 47-63, 1992.
88. J. M. Saravia M, T. M. Cano, B. Chávez, *et al.* “Extracción y caracterización de taninos en corteza de 3 especies forestales cultivadas en Guatemala: pino ocote (*Pinus oocarpa schiede*), encino negro (*quercus brachystachys benth*) y aliso común (*Alnus jorulensis HBK.*). Una alternativa de desarrollo agroindustrial”, Dirección General de Investigación (DIGI) , Guatemala, 2002.
89. European Chemicals Agency, “CMR substances from Annex VI of the CLP Regulation registered under REACH and notified under CLP-a first screening”, Helsinki, Finlandia, 2012.
90. Y. Yazaki y P. J. Collins, “Wood adhesives based on tannin extracts from barks of some pine and spruce species”, Holz als Roh- und Werkst., vol. 52, pp. 307-310, 1994.
91. Y. Yazaki y W. E. Hillis, “Molecular size distribution of radiata pine bark extracts and its effect on properties”, Holzforschung, vol. 34, n.º 4, pp. 125-130, 1980.
92. P. J. Collins y Y. Yazaki, “Tannin extraction and processing”, US5417888A, 1995.
93. G. Vázquez, J. González-Alvarez, S. Freire, *et al.* “Characteristics of *Pinus pinaster* bark extracts obtained under various extraction conditions”, Holz als Roh-und Werkst., vol. 59, pp. 451-456, 2001.
94. D. Aquino y J. Bueno, “Determinacion del contenido tánico de la corteza de cinco árboles forestales de la Amazonía peruana”, Rev. For. del Perú, vol. 10, pp. 1-10.
95. F. Bertaud, A. Pizzi y P. Navarrete, “Characterisation of industrial barks for their tannin contents for further green-wood based adhesives applications”, IntechFibres, pp. 1-29, 2010.
96. L. A. Panamgama, “Polyphenolic extracts of *Pinus radiata* bark and networking mechanisms of additive-accelerated polycondensates”, J. Appl. Polym. Sci., vol. 103, n.º 4, pp. 2487-2493, 2007.
97. A. Pizzi, “Condensed tannins for adhesives”, Ind. Eng. Chem. Prod. Res. Dev., vol. 21, n.º 3, pp. 359-369, 1982.
98. X. Zhou y A. Pizzi, “Pine tannin based adhesive mixes for plywood pine tannin based adhesive mixes for plywood”, Int. Wood Prod. J., vol. 5, n.º 1, pp. 27-32, 2014.

99. H. Saad, A. Khoukh, N. Ayed y B. Charrier, “Characterization of Tunisian Aleppo pine tannins for a potential use in wood adhesive formulation”, *Ind. Crop. Prod.*, vol. 61, pp. 517-525, 2014.
100. F. Pichelin, M. Nakatani, A. Pizzi, *et al.* “Structural beams from thick wood panels bonded industrially with formaldehyde-free tannin adhesives”, *For. Prod. J.*, vol. 56, n.º 5, pp. 31-36, 2006.
101. B. Yazaki y P. J. Collins, “Wood adhesives from high yield *Pinus radiata* bark extracts treated by a simple viscosity reduction process”, *Holzforsch. Int. J. Biol. Chem. Phys. Technol. Wood*, vol. 48, n.º 3, pp. 241-243, 1994.
102. I. Michalak, K. Chojnacka y A. Witek-krowiak, “State of the art for the biosorption process-a Review”, *Appl. Biochem. Biotechnol.*, vol. 170, pp. 1389-1416, 2013.
103. J. Sánchez Martín, J. Beltrán de Heredia Alonso, C. Carmona Murillo y P. Gibello Pérez, “Absorbentes naturales a partir de taninos. Una propuesta de reutilización de residuos forestales para la purificación de aguas”, *Cuides*, vol. 7, pp. 125-140, 2009.
104. I. Michalak, K. Chojnacka y A. Witek-Krowiak, “State of the art for the biosorption process-a review”, *Appl. Biochem. Biotechnol.*, vol. 170, pp. 1389-416, 2013.
105. P. M. Kunnambath y S. Thirumalaisamy, “Characterization and Utilization of Tannin Extract for the Selective Adsorption of Ni (II) Ions from Water”, *J. Chem.*, vol. 2015, n.º article ID 498359, p. 9, 2015.
106. M. Yurtsever y I. A. Sengil, “Biosorption of Pb (II) ions by modified quebracho tannin resin”, *J. Hazard. Mater.*, vol. 163, pp. 58-64, 2009.
107. I. A. Şengil y M. Özacar, “Biosorption of Cu (II) from aqueous solutions by mimosa tannin gel”, *J. Hazard. Mater.*, vol. 157, n.º 2-3, pp. 277-285, 2008.
108. M. Zhang, C. Ding, L. Chen y L. Huang, “Preparation of tannin-immobilized collagen/cellulose bead for Pb (II) adsorption in aqueous solutions”, *BioResources*, vol. 10, n.º 1, pp. 1773-1789, 2015.
109. X. Liao, H. Ma, R. Wang y B. Shi, “Adsorption of UO₂²⁺ on tannins immobilized collagen fiber membrane”, *J. Memb. Sci.*, vol. 243, n.º 1-2, pp. 235-241, 2004.
110. H. U. Kim, K. H. Kim, Y. Y. Chang, S. M. Lee y J.-K. Yang, “Heavy metal removal from aqueous solution by tannins immobilized on collagen”, *Desalin. Water Treat.*, vol. 48, n.º octubre 2014, pp. 1-8, 2012.
111. M. Čop, C. Lacoste, M. Conradi, *et al.* “The effect of the composition of spruce and pine tannin-based foams on their physical, morphological and compression properties”, *Ind. Crops Prod.*, vol. 74, pp. 158-164, 2015.

- 112.** G. Tondi y A. Pizzi, "Tannin-based rigid foams: characterization and modification", *Ind. Crops Prod.*, vol. 29, n.º 2-3, pp. 356-363, 2009.
- 113.** J. Sánchez-Martín, J. Beltrán-Heredia y P. Gibello-Pérez, "Adsorbent biopolymers from tannin extracts for water treatment", *Chem. Eng. J.*, vol. 168, pp. 1241-1247, 2011.
- 114.** W. Shirato y Y. Kamei, "Method for adsorbing and separating heavy metal, elements by using a tannin adsorbent and method of regenerating the adsorbent", US5460791A, 1995.
- 115.** M. Kila, "Wood sawdust and wood originate materials as adsorbents for heavy metal ions", pp. 69-73, 2004.
- 116.** Z. Huang, S. Liu, Q. Wu y B. Zhang, "Performance of amphoteric larch tannin derivative particles for removal of azo acid dyes", *BioResources*, vol. 8, n.º 4, pp. 6361-6372, 2013.
- 117.** K. Mulani, S. Daniels, K. Rajdeo, S. Tambe y N. Chavan, "Tannin-Aniline-Formaldehyde resole resins for arsenic removal from contaminated water", *Can. Chem. Trans.*, vol. 2, n.º 4, pp. 450-466, 2014.
- 118.** C. W. Oo, M. J. Kassim y A. Pizzi, "Characterization and performance of rhizophora apiculata mangrove polyflavonoid tannins in the adsorption of copper (II) and lead (II)", *Ind. Crops Prod.*, vol. 30, n.º 1, pp. 152-161, 2009.
- 119.** J. Sánchez-Martín, J. Beltrán-Heredia y P. Gibello-Pérez, "Adsorbent biopolymers from tannin extracts for water treatment", *Chem. Eng. J.*, vol. 168, n.º 3, pp. 1241-1247, 2011.

Otras aplicaciones para residuos de madera

En capítulos anteriores se abordó la profundización teórica sobre aplicaciones novedosas para el aprovechamiento de los residuos de la madera, pero no se han tratado las aplicaciones más típicas y convencionales. Es así que se expone a continuación un primer tema sobre los tableros fabricados con madera, incluyendo aquellos de partículas, de fibras, de virutas orientadas y los alistonados. La finalidad es establecer los requerimientos que deben cumplir los residuos para ser aptos en la fabricación de las distintas clases de tableros: tamaños (de partículas, de virutas, de fibras, de listones), contenido de humedad de las muestras, nivel de acidez, densidad del material, entre otros; adicionalmente, se analizarán sectores de aplicación y usos para cada una de las clases y se estudiarán los respectivos procesos de fabricación, que determinarán con más claridad las diferencias entre los tableros de madera.

Seguidamente se analizará la tendencia actual en la obtención de materiales compuestos, principalmente la influencia de los constituyentes de madera en la mejora de las propiedades de refuerzo respecto a la fase de origen llamada matriz, que puede ser de naturaleza cerámica o polimérica. En ambos tipos de compuestos clasificados a partir del tipo de matriz se abordarán sus generalidades, que de forma global acogen gran cantidad de aplicaciones y desarrollos de materiales compuestos; dentro de estos se analizará una aplicación particular como ejemplo: compuestos maderaplástico para los de matriz polimérica y compuestos madera-cemento para los de matriz cerámica.

Luego se abordará lo relacionado con compostaje. Se hará énfasis en la influencia de los residuos de madera en la elaboración de *compost* y en el efecto positivo que tiene sobre este la inclusión de residuos de madera;

para ello se determinarán parámetros de contenido ideal de taninos, lignina y celulosa, control de acidez y tamaño de residuos, entre otros.

Posteriormente se analizará lo que atañe al campo energético desde la elaboración de *pellets* a partir de madera, prácticamente la única aplicación analizada en la que el producto final se puede obtener sin necesidad de aditivos; aquí se determinarán de nuevo los parámetros de las propiedades físico-químicas que deben tener los residuos para que los *pellets* sean de buena calidad y se indicarán, además, algunos usos típicos para aquellos, que incluso se extienden más allá del campo energético.

Finalmente, se tratará una aplicación referente a la generación de materiales adsorbentes; aquí se determinarán los parámetros que deben cumplir los componentes de la madera para que el material absorbente tenga cualidades aceptables y de calidad según los estándares de la industria; además, se mencionarán sectores de aplicación y usos particulares.

1. Tableros a base de madera

Un tablero o panel es un producto forestal obtenido del procesamiento industrial de la madera presentado en forma de hojas constituidas por chapas, partículas o fibras. Existe una tendencia predominante en muchos países de Latinoamérica a fabricar y usar cada vez más los tableros a base de madera para fines estructurales o decorativos, motivados por el empleo de residuos de otros procesos de manufactura o de recursos de madera que no son adecuados para otros fines, como los árboles más pequeños y de baja durabilidad.^[1,2]

Los tipos de tableros se distinguen por ciertas características y presentan grandes ventajas con respecto al uso de la madera aserrada:^[1]

- Eliminar o reducir los efectos de debilitamiento en la madera aserrada, causados por nudos, desviación de la fibra u otros defectos.
- Cubrir con facilidad grandes superficies debido a que se fabrican en dimensiones mayores que las obtenidas en piezas de madera aserrada.
- Obtener una mejor estabilidad dimensional mediante la creación de componentes más uniformes y más fuertes que la madera sólida original.

- Utilizar madera residual procedente de otros procesos para reducir el desperdicio.
- Satisfacer necesidades específicas incorporando diversas sustancias o modificando convenientemente los tratamientos térmicos o mecánicos a los que pueden ser sometidos, con el fin de lograr elementos con determinadas características de resistencia al agua, al fuego, a la pudrición o a acciones mecánicas requeridas para aplicaciones estructurales.
- Utilizar árboles más pequeños y posibilitar el uso de especies de rápido crecimiento y de ciertas especies blandas y marginadas.

Los tableros a base de madera, en general, consisten en partículas de forma y tamaño muy variados unidas con un sistema adhesivo. Algunos estudios estiman que sus propiedades, particularmente las físico-mecánicas, están determinadas por el tipo, tamaño, distribución y orientación de las partículas, condiciones del proceso, contenido de humedad durante el prensado, tratamiento postmanufactura del tablero, e, inclusive, por el adhesivo seleccionado.^[3] Por esto, la forma de los elementos de madera que conforman los tableros se vuelve cada vez más importante: los productores buscan maximizar las propiedades de aquellos y, al mismo tiempo, minimizar el coste de producción.^[2] Las formas típicas de los residuos de madera generados se muestran en la **Figura 6-1**.



Figura 6-1. Formas más comunes de los residuos de la madera, desde el más grande hasta el más pequeño.

Tomada y modificada de^[4]

Los tableros se utilizan en aplicaciones estructurales y no estructurales en líneas de productos: paneles para cubrir interiores y para usos exteriores, muebles modulares o productos de tipo ensamble, mobiliario o estructuras de soporte en edificios, entre otras.^[5]

De acuerdo con Refort, de la Universidad Nacional de La Plata, los tableros a base de madera se clasifican en cinco tipos: de fibras, de partículas, de virutas, a base de láminas y chapas, y de madera maciza y compuestos; dentro de estos se encuentran variedades que amplían el panorama de los tableros que comercialmente se manufacturan en la industria. Esta clasificación se muestra en la **Tabla 6-1**.^[6]

Tabla 6-1. Clasificación de tableros a base de madera.

Tipo de tablero	Clase de tablero
Tableros de fibras.	<i>MDF - Medium density fiberboard.</i>
	<i>HDF - High density fiberboard.</i>
	<i>DFF - Density fiberboard phenolic.</i>
	<i>Tablero de fibras aislante.</i>
	<i>THDF - HB hardboard.</i>
Tableros de partículas.	<i>PB - Particle board.</i>
	Tablero de partículas alveolar y extrusionado.
	Tablero de partículas aislante.
	<i>HDP - High density particle board.</i>
	Tableros de madera cemento.
Tableros de virutas.	<i>OSB - Oriented strand board.</i>
	<i>WB - Wafer board.</i>
	<i>OSL - Oriented strand lumber.</i>
	<i>PSL - Parallel strand lumber.</i>
Tableros a base de láminas y chapas.	<i>Plywood.</i>
	<i>LVL - Laminated veneer lumber.</i>

Continúa en la siguiente página.

Continuación de la Tabla 6-1.

Tipo de tablero	Clase de tablero
Tableros de madera maciza y compuestos.	Tableros de listones.
	Placa de carpintero.
	OBS aislante.
	Vigas de materiales compuestos.

Tomada y modificada de^[6]

Para la fabricación de cada tipo de tablero se requieren elementos de madera de una calidad y configuración particular. Estas características, junto con el control de sus variaciones, permiten la fabricación con propiedades predeterminadas. En la **Figura 6-2** se observan algunos ejemplos de tableros a base de madera.

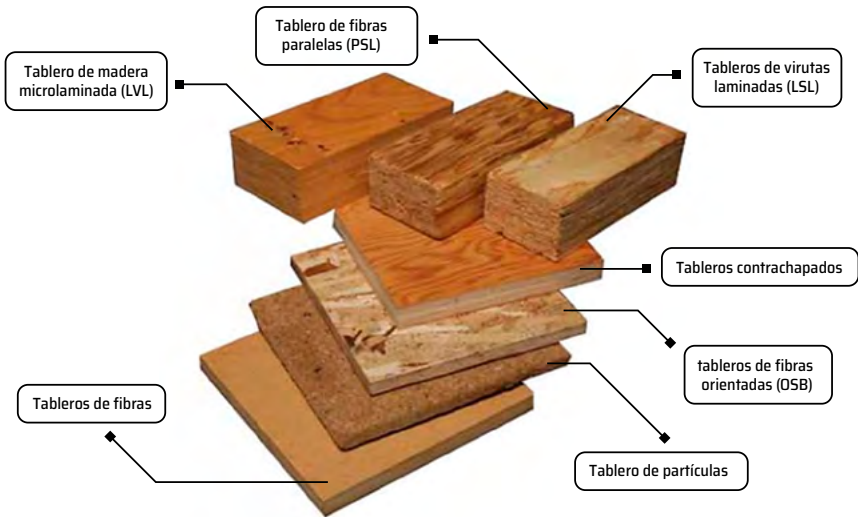


Figura 6-2. Tipos de tableros a base de madera.

Tomada y modificada de^[5]

La relación entre distintos parámetros físicos de la madera permite generar una idea del tipo de tableros que se pueden obtener; por ejemplo, la interrelación de características como gravedad específica, densidad relativa, tamaño de partículas y condiciones de proceso se muestra en la **Figura 6-3**.

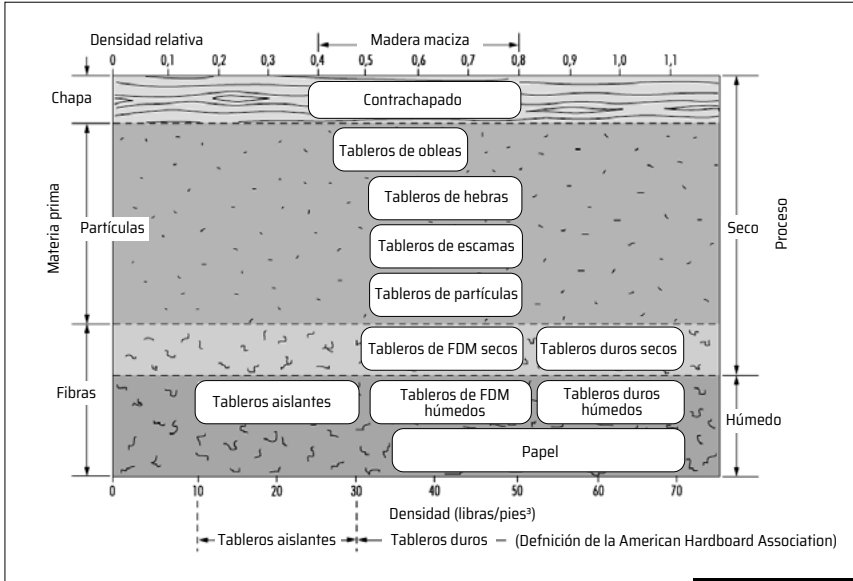


Figura 6-3. Clasificación de tableros de madera según materia prima, densidad relativa, densidad aparente y tipo de proceso.

Tomada y modificada de^[7]

El éxito de la industria de tableros a base de madera se debe a su capacidad para utilizar los residuos generados en la cadena productiva de este sector. El aserrín y las virutas son los más empleados para la elaboración de los tableros de tipo partículas, fibras y virutas. La fabricación de contrachapados exige condiciones geométricas particulares, especialmente en lo referente al espesor y ancho de la lámina, que solo se logran mediante procesos de transformación de las trozas de madera (no propiamente provienen de desechos); más aún, requiere procesos de manufactura dentro de la cadena productiva que son considerados primarios y no se aplican a la transformación de los desechos. Por lo anterior, los tableros contrachapados no serán considerados en este estudio.

Independientemente del tipo de tablero que se desee fabricar, el proceso de manufactura consta básicamente de las siguientes etapas:

- a. Identificación, obtención y preparación de los residuos de madera (materia prima).
- b. Mezcla de materia prima con adhesivos.
- c. Etapas de conformado-prensado (control de temperatura, humedad y presión).
- d. Secado.
- e. Acondicionamiento final (lijado, dimensionado, decorado, etc.).

Las tendencias actuales de la manufactura están encaminadas a mitigar los impactos ambientales mediante la adaptación de procesos “verdes”: la industria de tableros no se queda atrás. En la **Figura 6-4** se muestra claramente el proceso de fabricación de los tres tipos de tableros a base de madera comercialmente más usados (PB: *Particle board* / tablero de partículas; OSB: *Oriented strand board* / tableros de virutas orientadas; MDF: *Medium density fiberboard* / tablero de fibras de densidad media); en dicho proceso se realiza aprovechamiento de residuos, bien sea para la producción de los mismos tableros, bien sea para la recuperación en energía.

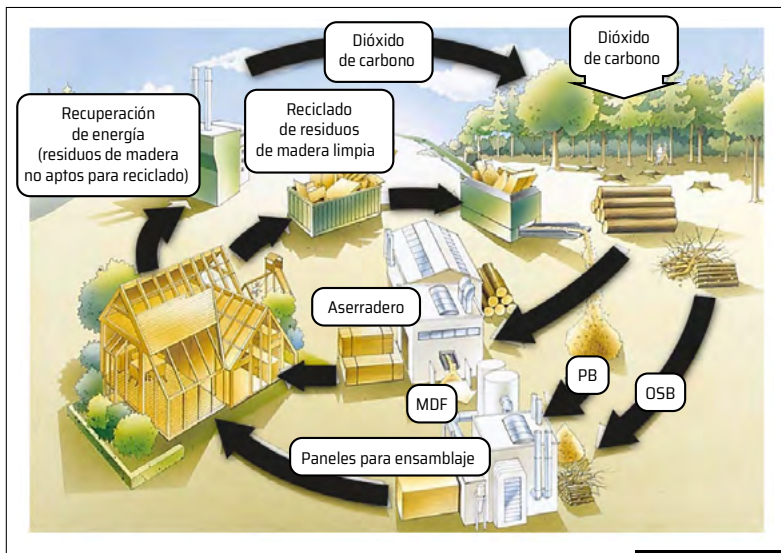


Figura 6-4. Ciclo de vida de los tableros a base de madera.
Tomada y modificada de^[5]

Es de interés, entonces, determinar los requerimientos de la primera etapa, es decir, caracterizar los residuos de madera con el fin de identificar aquellos parámetros que son relevantes para su utilización en los tipos de tableros seleccionados (estos residuos se denominarán, en adelante, materia prima).

A continuación, se analizarán los diferentes tipos de tableros, el proceso de manufactura llevado a cabo para su producción y, en especial, las características particulares que se han de controlar en la materia prima.

Tableros de partículas

Se fabrican a partir de pequeñas partículas de madera (obtenidas de la reducción mecánica de virutas, hojuelas, aserrín, despuntes y similares), aplicando adhesivos o resinas sintéticas que luego son sometidos a altas presiones y temperaturas hasta formar láminas. Usualmente, los adhesivos utilizados son a base de urea-formaldehído (UF) y fenol-formaldehído, aunque las resinas fenólicas (PF) y melamina-formaldehído (MF) a veces se utilizan para aplicaciones que requieren más resistencia a la humedad. Para el acabado final, por su parte, se utilizan recubrimientos tipo melaminas, chapas naturales y sintéticas, lacado, papel fenólico, placas de acero o cobre, laminados plásticos, etc.^[8]

Típicamente, el tablero de partículas se hace en capas, de tres a cinco: las capas internas (o núcleo) consisten en partículas gruesas de densidad más baja y las capas exteriores (o caras) están hechas de partículas más finas, de mayor densidad.^[5,9] Esta distribución de densidad y tamaño de partículas es importante para el rendimiento del tablero, su resistencia mecánica y su apariencia. Partículas típicas para la fabricación de este tipo de tableros se muestran en la **Figura 6-5**.

El resultado para este tipo de tableros se basa en una superficie más lisa para la laminación, superposición, pintura o recubrimiento.^[5] En la **Figura 6-6** se aprecia la apariencia típica de los tableros de partículas.



Figura 6-5. Partículas para tableros aglomerados.
Tomada y modificada de^[6]



Figura 6-6. Tableros de partículas con caras laminadas.
Tomada y modificada de^[147]

El proceso típico de fabricación de los tableros de partículas se muestra en la **Figura 6-7**, donde se observa la etapa de preparación del material (mediante procesos mecánicos llevados a cabo en trituradoras, molinos, chipeadoras), y cuya clasificación y separación de tamaño se realiza por medio de tamices que permiten minimizar el efecto negativo sobre el producto terminado debido a que las partículas muy pequeñas (finas) aumentan la superficie de la partícula y, así, los requerimientos de resina, mientras que las partículas de gran tamaño pueden afectar negativamente la calidad del producto final debido a defectos internos en las partículas.^[5]

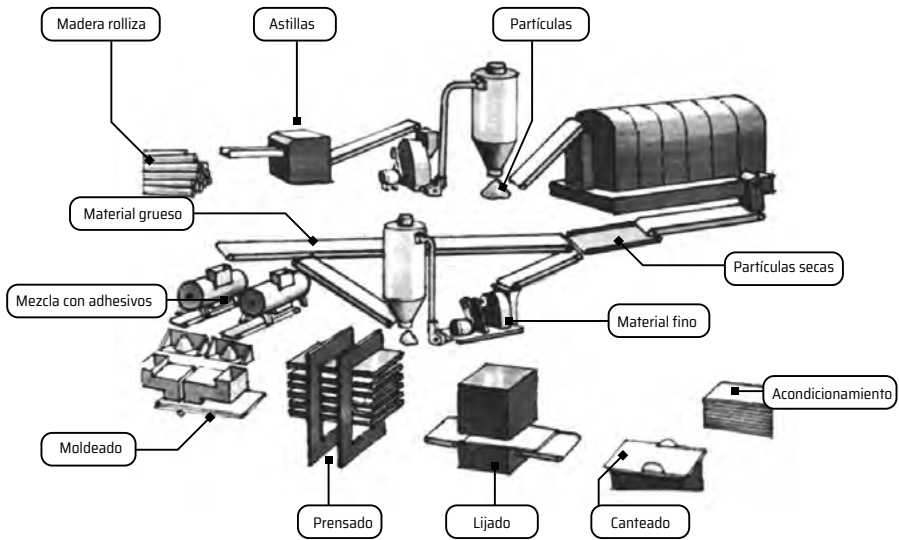


Figura 6-7. Proceso de fabricación tablero de partículas.

Tomada y modificada de^[1]

El objetivo es lograr un producto que tenga características físicas semejantes o superiores a las de piezas de madera maciza y tableros contrachapados hechos de la misma especie, aunque no de igual densidad. Así los tableros tengan igual densidad que la madera de la que provienen, sus partículas tienen una resistencia mecánica menor que la de la madera de origen, pero cuentan con características similares en las otras propiedades.

Estos tableros tienen como ventaja que no sufren alabeos, como la madera sólida o la contrachapada, pero generalmente son menos resistentes a la humedad. Finalmente, aunque son muchas las especies que se utilizan, suelen preferirse las que son de baja densidad.^[1]

Estos tipos de tableros son utilizados en fabricación de muebles (generalmente recubiertos con otros materiales para los propósitos decorativos), en pisos, casas prefabricadas o como paneles. Algunas de estas aplicaciones se muestran en la **Figura 6-8**.

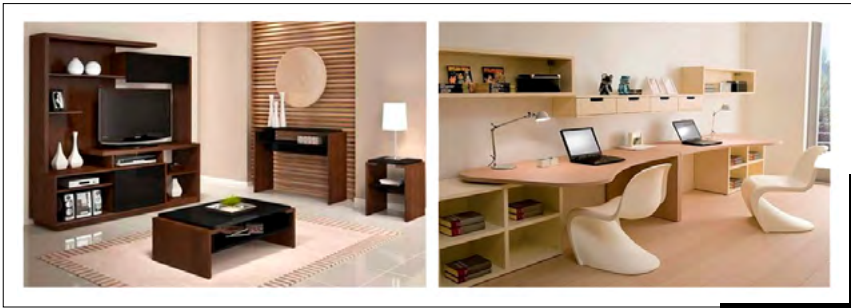


Figura 6-8. Decoración de interiores con tableros de partículas.
Tomada y modificada de^[147]

Características identificadas de las especies maderables

Humedad de partículas. Las partículas se someten a un proceso de secado, usualmente en una secadora de tambor. La temperatura en la zona por donde pasan (dentro de la secadora) puede alcanzar hasta 870 °C cuando las partículas están muy húmedas; para partículas más secas se usan temperaturas cercanas a los 260 °C. Aunque el contenido de humedad (CH) final del tablero es por lo regular de alrededor del 10 %, las partículas se deben secar a contenidos de humedad inferiores a este valor, para tomar en cuenta el aumento en CH debido al agua proveniente del adhesivo. Así, el CH usual de las partículas al salir de la secadora deberá estar entre un 3% y un 4%.^[1]

Tamaño de partícula. La geometría de las partículas tiene un papel importante en las propiedades mecánicas finales del tablero; por ejemplo, al aumentar el largo de estas, la propiedad de la flexión y los módulos de

elasticidad y de rotura se afectan en forma positiva e incrementan sus valores. Hecho similar se presenta con el espesor de las partículas: al aumentarlo se incrementan la propiedad de la tracción perpendicular al plano y la resistencia a la extracción de tornillos; sin embargo, y contrario a estas dos características, el ancho es la dimensión que menor influencia tiene en la variación de las propiedades del tablero.^[11]

Una vez secas, las partículas se tamizan para remover el polvo y para separarlas por tamaño, de tal manera que las más pequeñas se puedan usar para las caras superficiales y las más grandes para los centros de los tableros. Si el polvo no es retirado, tiende a absorber gran cantidad de resina, reduciendo así la resistencia mecánica del panel.^[1]

Se ha desarrollado un factor determinante para la clasificación de las partículas denominado “coeficiente de esbeltez E”, que es una relación entre longitud y espesor de las partículas, según la siguiente ecuación:

$$E = \frac{L}{e}$$

L y e son, respectivamente, la longitud y el espesor de las partículas.^[3]

Estudios realizados por Zambrano (en estos llevó a cabo procesos para obtener partículas con una dimensión promedio de 20 mm de longitud, ancho variable y espesor de 0,25 mm) demuestran que este tamaño de partícula entrega propiedades finales óptimas para cumplir con las normas establecidas para tableros. Además, concluye que el valor promedio del coeficiente de esbeltez para las partículas se encuentra dentro del rango de 120 a 200, intervalo considerado por otros autores como óptimo para la elaboración de tableros de partículas con propiedades físicas y mecánicas aceptables.^[3]

Cea, por su lado, toma como referente autores que recomiendan el coeficiente de esbeltez en un rango de partículas de 60 a 120 y afirma que en este rango los tableros obtenidos han mostrado propiedades aceptables.^[11]

De lo anterior se concluye que el rango para el coeficiente de esbeltez puede estar entre 60 y 200.

Densidad-Relación de compresión (RC). La razón de compresión determina la compactación de las partículas en el proceso de fabricación de los tableros de este tipo, factor que influye, además, en la cantidad de material que se ha de utilizar por volumen de tableros por producirse. Se expresa según la ecuación:^[12]

$$RC = \frac{\text{Densidad del tablero}}{\text{Densidad de la madera}}$$

De acuerdo con esta ecuación, el volumen de madera por incorporar en el tablero para una densidad determinada, es inversamente proporcional a la densidad de la propia madera. Esta relación, según los estudios realizados por Poblete^[13] y Cea,^[11] se estima en un rango entre 1,15 y 2,2, con el fin de obtener propiedades mecánicas aceptables para los tableros.^[14]

Control de acidez pH. El valor de pH afecta el proceso de fabricación principalmente en el encolado, por lo que necesariamente debe ser controlado, dado que al tener la madera un pH no compatible con el adhesivo, se afectan las propiedades mecánicas. Esta característica favorecería el proceso de fraguado, ya que las condiciones óptimas para el fraguado de este adhesivo se dan en un ambiente con pH de 3 a 3,5.^[14]

Inclusión de corteza. El efecto de utilización de corteza como material de aporte para la fabricación de tableros de partículas produce cambios en las propiedades físicas. A pesar de que al aumentar el contenido de corteza se provoca una reducción en las propiedades físicas, mecánicas, de la estabilidad dimensional y apariencia de los tableros, es posible emplearla hasta en un valor máximo del 30%, obteniendo aun propiedades aceptables para aquellos.^[11,14]

Inclusión de aserrín. Un estudio realizado por Poblete *et al.*^[15] muestra la relevancia de la inclusión de aserrín (*sawdust*) en las propiedades de los tableros de partículas. En este estudio utilizan aserrín tamizado en cuatro clases (4,0-2,0-1,0-0,5 mm) y obtienen dos resultados importantes:

- El efecto del aserrín sobre las propiedades físicas fue en general poco significativo: tuvo una mayor relevancia con la variable densidad del tablero.
- La inclusión de aserrín afectó todas las propiedades mecánicas de forma negativa, salvo la propiedad de tracción perpendicular.

Tableros de fibras

Son elaborados a base de fibras lignocelulósicas entrecruzadas, unidas entre sí ya sea añadiendo un adhesivo sintético o aprovechando la propiedad aglutinante inherente a los polímeros, especialmente la lignina. Al ser la madera fibrosa por naturaleza, los tableros de fibra explotan las propiedades inherentes a esta en mayor grado que los tableros de partículas.^[16] La materia prima para estos tableros suele ser una combinación de residuos de aserradero (virutas y aserrín) y las virutas obtenidas de la madera en rollo; sin embargo, por el reciclaje y las preocupaciones medioambientales que se están convirtiendo en norma son utilizados papel de desecho, seda de maíz, bagazo (fibras de caña de azúcar), cartón, contenedores de bebidas de cartón e, incluso, directorios telefónicos y viejos periódicos. Tableros de fibras típicos se muestran en la **Figura 6-9**.



Figura 6-9. Tableros de fibras.
Tomada y modificada de^[17]

Los tableros de fibras tienen forma de láminas, típicamente de menos de 25 mm de espesor. Se requieren dos etapas en su fabricación: la primera es la desintegración de elementos de madera más grandes en fibras y la segunda es la formación de una estructura de lámina o tablero.^[9] Las fibras típicas para la fabricación de este tipo de tableros se muestran en la **Figura 6-10**; aquellas se obtienen de un proceso de pulpado termomecánico.^[1.8] Las fibras deben ser previamente lavadas para eliminar la corteza, arena y contaminantes abrasivos que pueden afectar la calidad. La separación de las fibras ocurre en un refinador de discos, que consiste en un disco fijo y en uno giratorio.^[2]



Figura 6-10. Fibra típica para fabricación de tableros MDF.
Tomada y modificada de^[6]

El proceso de elaboración de tableros de fibras se esquematiza en la **Figura 6-11**; este puede ser húmedo o seco. El tablero de fibras obtenido por proceso seco se fabrica de manera similar al del cartón. La resina y otros aditivos se aplican a las fibras por pulverización en mezcladores de retención corta o se introducen cuando las fibras húmedas son alimentadas desde el refinador a un secador de línea de soplado. Alternativamente, algunas plantas añaden la resina en el refinador.^[5] Las fibras recubiertas con adhesivo se colocan en una estera para posterior prensado. Por su parte, en el proceso húmedo los “aditivos químicos” son añadidos en la suspensión de agua y precipitan

en las fibras por reducción de pH.^[9] Es de destacar que en este proceso no se utilizan aglutinantes adicionales. Si la biomasa lignocelulósica tiene alto contenido de lignina y esta se retiene durante la operación de refinado, la lignina puede servir como aglutinante, puesto que bajo calor y presión fluye y actúa como un adhesivo termoendurecible, mejorando así los enlaces de hidrógeno naturales. Por lo anterior, esta última tecnología ha tomado mucha fuerza y ofrece importantes oportunidades en la reducción de demanda energética, aumento del rendimiento estructural del tablero, reutilización de papel recuperado, eliminación de la etapa del secado antes del reformado y eliminación de las aguas residuales de proceso.^[5] Finalmente, en el proceso de prensado en caliente se aplica una combinación de calor (entre 180 y 210 °C) y presión (entre 0,5 y 5,9 MPa) para consolidar el lecho y convertirlo en un panel o lámina. Después de prensar, dichos paneles se colocan sobre una rueda de refrigeración o sobre sus bordes para exponer las caras de los paneles al aire ambiente: esto permite un enfriamiento rápido; en esta última etapa, la humedad en el producto es constante entre 5% y 8%.

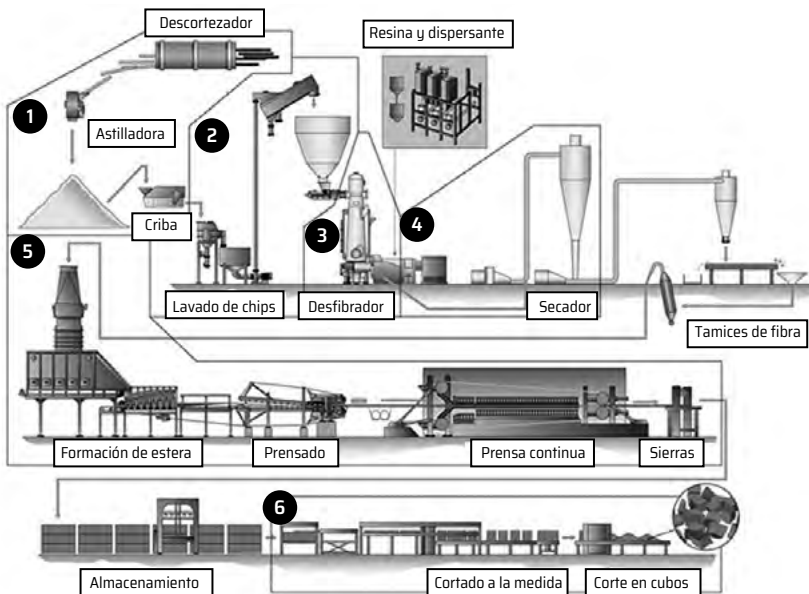


Figura 6-11. Proceso de fabricación de tableros de fibras.

Tomada y modificada de^[18]

El término “tableros de fibras” incluye tableros duros (DFF), tableros de fibra de densidad media (MDF), alta (HDF) o baja; y tableros de fibras celulósicas, clasificados así por su densidad y por el proceso de elaboración. Los procesos secos son aplicables a tableros de alta densidad (tableros duros) y de densidad media (MDF), mientras que los procesos húmedos son aplicables tanto a los tableros duros de alta densidad como a los de fibras celulósicas de baja densidad.^[5] A continuación se describen brevemente los tipos de tableros de fibras, sus características particulares y sus usos.

MDF (tablero de fibra de densidad media / *medium density fiberboard*).

Estos tableros están formados por fibras lignocelulósicas aglomeradas con resinas sintéticas u otro adhesivo adecuado y prensado en caliente. Al estar constituido por fibras encoladas, se obtiene un panel que conserva gran parte de las características de la madera de origen, ya que las fibras, su principal componente, junto con el agregado de resinas sintéticas, le otorgan propiedades mecánicas similares a las de la madera natural. La estructura homogénea que se logra en los MDF confiere buena resistencia a la flexión, superficie lisa y libre de defectos en ambas caras y propiedades de retención de tornillos; sus propiedades uniformes llevan a que sean mecanizados (cortados, moldeados, fresados) con mucha facilidad, para obtener un acabado decorativo necesario en un amplio campo de aplicaciones.

Este tipo de tablero tiene típicamente una densidad de entre 600 y 800 kg/m³ y se utiliza a menudo como sustituto de la madera contrachapada convencional (se requiere una mayor resistencia y flexibilidad). Sin embargo, es vulnerable a la rotura cuando se sumergen en agua y se contrae cuando se expone a ambientes húmedos bajos.

Entre sus aplicaciones se encuentran: muebles para hogar y oficinas, molduras, paneles enchapados en madera, pisos flotantes y deportivos, tabiques y estantes, bastidores de puertas placa, gabinetes de televisión y audio, marcos de cuadros y espejos, juguetes, interiores de vehículos, elementos de electrónica industrial. Generalmente, cuando se utilizan en interiores, son pintados y el color ligero de la fibra es deseable, como consecuencia de bajas temperaturas de prensado. Colores más oscuros de las fibras (y, por ende, del tablero) se obtienen como consecuencia de la degradación de la hemicelulosa en procesos de postratamiento a altas temperaturas.^[9]

HDF (tablero de fibra de alta densidad / *high density fiberboard*). Tiene una densidad de 800 a 900 kg/m³ y comparado con los otros tipos de tablero es más duro, sólido y durable.

Sus aplicaciones incluyen revestimiento exterior, revestimiento interior de paredes, mobiliario doméstico y comercial, y productos industriales y comerciales. Una vez más, se utiliza para la producción de muebles, así como para la fabricación de pisos y proyectos de construcción; su resistencia y durabilidad garantizarán un resultado de alta calidad.

LDF (tablero de fibra de baja densidad / *low density fiberboard*). Son placas formadas en proceso de desfibrado en húmedo. Su densidad típica es alrededor de 160 y 450 kg/m³, y entre los tres tipos, es el menos fuerte. Además, es el más barato y su vulnerabilidad a la humedad lo hace inapropiado para uso externo, por lo que funciona principalmente en capas aislantes de productos exteriores (revestimiento, aislamiento de tejado), productos interiores (tableros de construcción, tejas de techo y placas de absorción acústica) y productos industriales (casas móviles y en la industria del automóvil y del mueble).^[9]

DFF (tablero de fibra duro fenólico / *density fiberboard phenolic*). Son placas formadas en proceso de desfibrado en seco con fibras de lignocelulosa de la madera. Para unir las fibras, se impregnan resinas fenólicas termoendurecibles y aceites para obtener un material más fuerte, impermeable y resistente a la abrasión. Son de alta densidad, aproximadamente 1.400 kg/m³, generalmente delgados y de uso exterior en mobiliario urbano (juegos infantiles en parques), muebles de jardín y exterior, cabinas de baños y taquillas para lugares públicos, gimnasios, mobiliario de oficinas, etc.

THDF (tablero de fibras duro / *thin high density fiberboard*). También conocidos como *HB hardboard*, tienen una densidad variable entre 800 y 1.000 kg/m³. Son tableros formados por fibras de madera u otro material leñoso cuya particularidad es que no se agregan adhesivos, ya que al aplicar temperatura y presión, la lignina plastifica (cemento natural de la madera) y al enfriar actúa como cementante.^[19]

Dependiendo de las aplicaciones propuestas, es posible incorporar aditivos para mejorar algunas de las propiedades de los tableros de fibras. Se pueden incluir ceras para aumentar la repelencia a la humedad y los productos ignífugos, insecticidas y fungicidas. Aplicaciones típicas de estos tableros se muestran en la **Figura 6-12**.

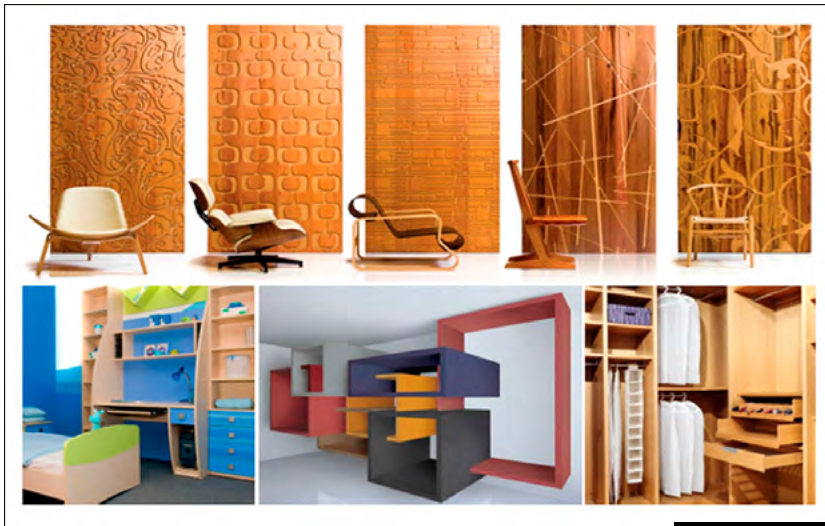


Figura 6-12. Aplicaciones tableros de fibras.
Tomada y modificada de^[147]

Para concluir, entre las ventajas que presenta este tipo de tableros, en comparación con el aglomerado de partículas, están: su superficie realmente lisa, incluso se podría decir que suave, lo que lo convierte en un material ideal para la aplicación de pinturas, lacas y barnices; su buen comportamiento en el uso de adhesivos y colas; y su flexibilidad.

Características identificadas de las especies maderables

- **Obtención de fibras**
 - **A partir de chips.** Usualmente, las fibras se obtienen de chips de madera o trozos que no han sido de utilidad para la manufactura de productos primarios en la cadena productiva (con una geometría típica cuadrada y uniforme, con lados aproximadamente de 25 mm por 5 mm de espesor). Los chips posteriormente se someten a un astillado en molinos para reducir su tamaño y convertirlos en partículas; estas deberán tener una granulometría mayor que 0,5 mm para poder ser sometidas a un proceso de desfibrado en el cual se obtienen las fibras lignocelulósicas. El material que tenga una granulometría inferior a la mencionada será rechazado.^[2,20]
 - **A partir de astillas.** Keil y Spavento realizaron un estudio de obtención de fibras para tableros MDF a partir de astillas generadas en aserríos y concluyeron que para obtener tableros MDF de buena calidad se pueden usar astillas de las siguientes dimensiones: largo, entre 25 y 30 mm; ancho, 20 mm; espesor, 5 mm.^[19]
 - **Contenido de humedad de la madera para desfibrado.** La madera debe contener un 50% de humedad para una desfibración mucho más fácil y uniforme.^[19]
- **Contenido de humedad de las fibras.** Las fibras deben someterse a un proceso de secado en horno a tal punto que el contenido de humedad no sea mayor del 5% al momento de la manufactura del tablero.^[20]
- **Longitud de fibras.** Rolleli recomienda para las capas superficiales de los tableros MDF fibras que tengan una longitud entre 0,2 y 2,0 mm.^[20]
- **Influencia de especies.** Con independencia de la especie de madera empleada, la clave para producir un tablero MDF de calidad reside en la utilización de fibras individualizadas y homogéneas.^[19]
- **Higiene de astillas.** Antes del proceso de desfibrado, las astillas se lavan para conseguir un tablero de bajo contenido de impurezas minerales, con el fin de eliminar las posibles arenas o metales que pudieran incorporar y que provocarían trastornos durante las siguientes etapas del proceso y un mayor desgaste de las herramientas de corte al elaborar el producto.^[19]

- **Concentración de la fibra.** El espesor del tablero que se va a obtener depende de la concentración de fibra, y esta influye notablemente en las propiedades mecánicas de los tableros: concentraciones entre 60% y 80% ofrecen los mejores resultados.^[19]
- **Control de pH.** La acidez de la mezcla debe tener un pH entre 3,8 y 4,2 cuando se adiciona resina, y de 4,8 a 5 cuando no se adiciona y se aprovecha la lignina de la madera.
- **Inclusión de corteza.** La presencia de corteza en tableros de fibras no ha sido tan estudiada como en los tableros de partículas; sin embargo, se registran experiencias que indican que al incluir corteza propiedades físicas como el hinchamiento y la absorción de agua se ven mejoradas, efecto que se debe a una acción repelente al agua de algunos compuestos de esta materia prima; no obstante, dichas experiencias han determinado también que las propiedades mecánicas disminuyen al aumentar la proporción de corteza, por lo cual debe tenerse cuidado especial en la inclusión de esta materia prima en los tableros de fibras. Las experiencias industriales con HDF indican que se puede utilizar hasta un 14% de corteza con un efecto positivo en la estabilidad dimensional y una leve pérdida de las propiedades mecánicas.^[13]

Tableros de virutas orientadas

Los tableros de virutas orientadas se desarrollaron originalmente como una alternativa a la madera contrachapada para superar la disminución en la disponibilidad de troncos de gran diámetro utilizados para producir dicha madera. La principal ventaja del OSB en comparación con la madera contrachapada es que se puede hacer de troncos de diámetro pequeño. Las virutas van dispuestas en tres o cinco capas perfectamente diferenciadas y orientadas. En las capas exteriores, los hilos más largos son generalmente alineados en dirección longitudinal, mientras que las virutas más pequeñas y finas de las capas internas están dispuestas aleatoriamente o en dirección perpendicular a la longitud del tablero; es decir, las capas pueden formar ángulos rectos entre sí, tal como ocurre en los contrachapados.^[5]

Esta orientación de las capas confiere a los OSB características únicas, incluyendo mayor resistencia a la flexión, estabilidad dimensional, rigidez, resistencia a la deformación, ruptura y delaminado, larga duración y conservación.^[21] Virutas típicas para la fabricación de estos tableros se muestran en la **Figura 6-13**.



Figura 6-13. Virutas para fabricación de tableros OSB.
Tomada y modificada de^[147]

Los OSB son perfectamente identificables por el tamaño de las virutas y por su orientación en la superficie del tablero, tal y como se observa en la **Figura 6-14**, aunque no siempre la orientación es visible, sobre todo si se trata de piezas pequeñas de tablero. Aunque está constituida por virutas relativamente largas, la superficie de estos tableros es maciza y relativamente lisa, y puede ser mejorada cuando se lija sin perder el aspecto estético y único de los OSB. Las maderas utilizadas en la producción de estos tableros son, en su mayoría, de coníferas (pino y abeto) y, en menor medida, las frondosas.^[22]



Figura 6-14. Tableros de virutas orientadas.
Tomada y modificada de^[23]

Debido a sus excelentes propiedades físico-mecánicas y a su uniformidad y homogeneidad, producto de la gran cantidad de hilos presentes en una lámina, los OSB son un producto apropiado para aplicaciones estructurales en la construcción, sobre todo como soporte para pavimentos y revestimiento de paredes y de tejados estructurales.^[21]

Usualmente, este tipo de tableros, por las características mencionadas anteriormente y por los desarrollos tecnológicos, se usan en el campo de la construcción de viviendas residenciales, dado que son estructuras que demandan resistencia, dureza y durabilidad de los materiales utilizados; así, los empleos más frecuentes son los que siguen: en cubiertas de paredes, cubiertas de techos, bajo-piso, pisos de una cubierta o forros, paneles de estructuras y aislantes (cierres perimetrales de edificios, tabiques estructurales y vigas doble T, viguetas tipo I), y, por supuesto, en la industria del mueble para la fabricación de parlantes, paneles de división, tapicería y embalajes.^[21] La **Figura 6-15** muestra la implementación de este tipo de tableros en el sector de vivienda residencial.



Figura 6-15. Tableros OSB utilizados en construcción residencial.
Tomada y modificada de^[21]

La **Tabla 6-2** muestra algunos usos típicos para este tipo de tableros en relación con su espesor.

Tabla 6-2. Usos finales estructurales para tableros OSB en condiciones secas.

Aplicaciones	Espesor recomendado (mm)
Vallas publicitarias.	11,18
Decoración interior.	18
Paneles para exposición.	18
Estanterías.	18,22
Empaquetados, estibas.	11,12,18
Coberturas para jardines.	9,11,18
Proyectos DIY (“Do it yourself” en español “Hazlo tú mismo”).	9,11,18

Tomada y modificada de^[24]

En general, para fabricar OSB, los troncos descortezados se cortan en largos y delgados elementos de madera llamados hilos (con medidas, generalmente, de entre 75 y 150 mm de largo, 25 mm de ancho y 0,8 mm de grosor), que luego se secan, se mezclan con resina y cera (se utilizan, principalmente, cuatro tipos de resinas: urea-formol, urea-melamina formol, fenol-formaldehído y poliuretano; en función del destino del tablero, este será fabricado con uno u otro tipo de adhesivo; el uso de urea-formol está reservado para tableros de interior), en una operación altamente controlada con mezcladores rotativos separados. Los hilos con adhesivo aplicado se envían a los formadores de malla, que se encargan de alinearlos a lo largo de la longitud y ancho del panel; estas esteras formadas y sueltamente consolidadas se someten a altas temperaturas y presión, dando así origen a tableros de grandes dimensiones que son luego cortados y sellados en sus cantos.^[21] El proceso típico de fabricación se esquematiza en la **Figura 6-16**.

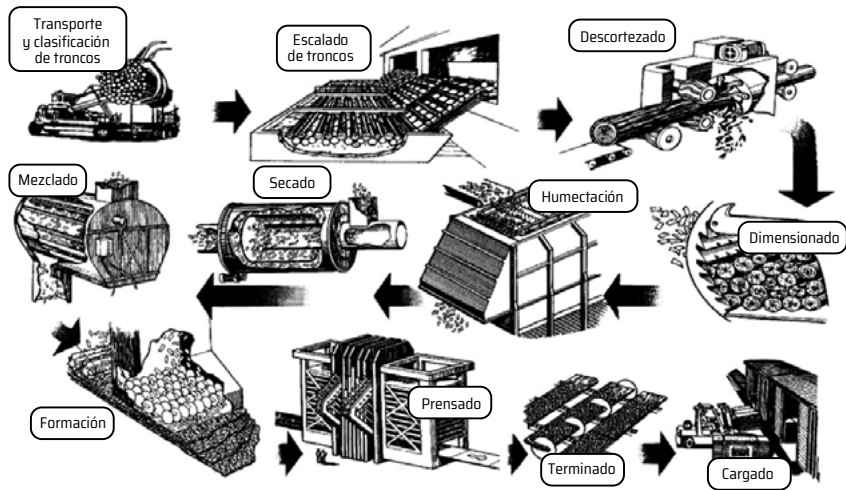


Figura 6-16. Proceso de fabricación de un tablero OSB.
Tomada y modificada de^[8]

Este tipo de tableros, por su naturaleza, no presenta defectos, como sí ocurre con la madera sólida: no tiene nudos, puntos débiles, médulas huecas ni rajaduras, y a la hora del maquinado resulta un material sencillo de trabajar,

dado que se puede aserrar, taladrar, cepillar, fresar y lijar fácilmente.^[9,21] Una limitación es la hinchazón de los bordes, aunque están recubiertos durante el transporte; el corte posterior, además, causa limitaciones en aplicaciones de alta humedad.^[9] Sin embargo, esto no es impedimento para que el mercado de OSB esté aumentando como resultado de su menor costo en comparación con la madera contrachapada.

El 95% de las viviendas de Estados Unidos y Canadá se construyen con este sistema por la mayor rapidez, excelentes características de habitabilidad y resistencia a las variaciones de temperatura que enfrentan en esas latitudes.^[21] En Latinoamérica el panorama es muy diferente: los países que registran una mayor demanda del tablero OSB son, en orden, Chile, Brasil, Argentina y México. Particularmente, en Colombia el panorama es desalentador, así que se debe incentivar su uso a la hora de construir para gozar de sus ventajas.^[21]

La búsqueda de nuevas aplicaciones para los tableros requiere de la innovación en sus propiedades; mejoras en el aislamiento, en la regulación de las condiciones ambientales, en su resistencia al fuego, e incremento de sus propiedades físico-mecánicas, con el fin de ampliar la diversificación de sus usos. La demanda de soluciones más eficaces en el campo de la acústica arquitectónica y del aislamiento térmico está propiciando el empleo de materiales ligeros y de elevada permeabilidad. Al mismo tiempo, estos materiales deben optimizar la relación entre su densidad y su porosidad para potenciar las prestaciones térmicas y acústicas, sin penalizar en exceso su comportamiento mecánico, y que se doten con propiedades interesantes para diversas aplicaciones. Es así como se proponen mezclas de madera con otros compuestos.

Características identificadas de las especies maderables

- **Obtención de virutas.** Las virutas son cortadas tangencialmente a partir de los troncos de madera previamente descortezados por medio de cuchillas dispuestas en tambores rotatorios, introducidos estos troncos en dirección longitudinal.^[22]
- **Tamaño de viruta.** La Federación Europea de Paneles recomienda que las partículas tengan un ancho aproximado de 75 mm; posteriormente

son reprocesadas hasta tener un tamaño final típico de entre 5 y 10 mm de ancho y de 100 a 120 mm de largo, siempre en dirección de la fibra.^[22]

- **Contenido de humedad.** Según investigaciones y estudios reportados por distintos autores, el contenido de humedad de las virutas que serán procesadas para manufacturar tableros OSB debe estar entre el rango de 5% y 10%, ya que en este se asegura una buena reacción de la resina y de los componentes de madera en el proceso de prensado.^[25-28]
- **Densidad.** González Prieto *et al.* analizan el efecto de la variación de densidad de la madera utilizada para la obtención de virutas (en distintas partes del tronco del árbol) sobre la calidad final del tablero OSB: obtuvieron resultados favorables para la parte interna en el rango comprendido entre 480 kg/m³ y 502 kg/m³, y en el caso de la corteza en un rango entre 635 kg/m³ y 654 kg/m³.^[29] En estos rangos se ven mejoras en las propiedades de tracción y resistencia a la flexión.
- **Control de pH.** Estudios realizados por Flores Martínez señalan que el contenido de pH de la madera para la fabricación de los tableros OSB debe ser menor que 5,6, ya que un ambiente ácido facilita el fraguado de los adhesivos; por tanto, con pH superiores a este la solidificación del tablero se ve afectada y las propiedades mecánicas y físicas disminuidas.^[30]
- **Inclusión de residuos de madera.** Estudios realizados por Arcos y Allen, pertenecientes a la Universidad Bío-Bío de Chile,^[31] determinaron que para obtener tableros de virutas de calidad aceptable debe implementarse el contenido de estas en un rango entre 90% y 95%; el resto de la composición la completan las ceras o resinas. Con este porcentaje de virutas, las propiedades del tablero son adecuadas y el proceso de compresión y conformación arroja al final tableros cuya densidad responde a las normativas aplicables.
- **Afinidad de especies.** De acuerdo con los estudios de varios autores analizados, la materia prima utilizada en la fabricación de los tableros de virutas es generalmente de especies coníferas (usualmente pino), debido a que estas presentan resultados positivos en las propiedades físico-mecánicas de los tableros manufacturados.^[32-34]

Tableros alistonados

La fabricación de estos tableros se ha convertido en un reto tecnológico; se utiliza madera de alta y baja calidad para obtener productos de madera estructural de alta calidad mediante el aprovechamiento de los residuos de madera generados en los procesos primarios de la cadena productiva de las empresas (tales como los bordes, extremos cortos y los bloques), aumentando así su rendimiento al darles un valor agregado; se obtiene un producto más fuerte, más predecible y menos variable que un elemento de madera maciza con dimensiones equivalentes. Residuos de estas formas se observan en la **Figura 6-17**.



Figura 6-17. Materia prima para tableros alistonados.
Tomada y modificada de^[35]

El principio de manufactura de los tableros alistonados se basa en la unión de listones, tiras, varillas de madera o retales sobrantes en las carpinterías y aserraderos, que son mecanizados para llevarlos a medidas requeridas según la necesidad del tablero. También es posible unir varios listones; en este caso el largo puede ser variable, pero se debe garantizar que el ancho y espesor sean iguales, de tal suerte que se obtengan piezas de mayor dimensión en comparación con las originales.^[36] Esta disposición se muestra en la **Figura 6-18**.

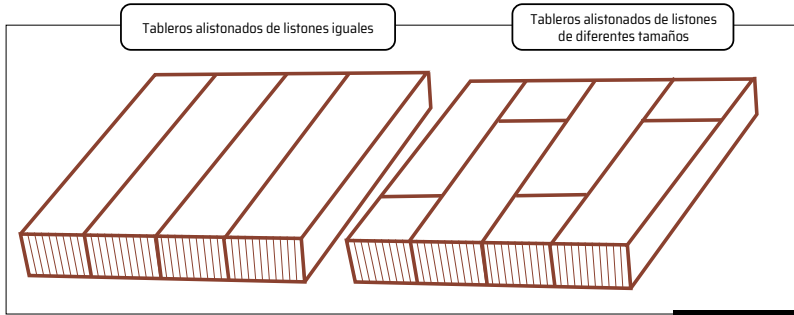


Figura 6-18. Disposición de los listones en un tablero alistonado.
Tomada y modificada de^[36]

El objetivo principal del desarrollo de este tipo de tableros es evitar el efecto de la flexión que presentan los tableros de madera maciza con el paso del tiempo, pues suele suceder que las tablas anchas se comban (flectan) en sentido contrario a los anillos de crecimiento, produciendo así deformaciones estructurales en los tableros e inestabilidad en las estructuras. Como solución surge la opción de dividirlos en estrechos listones con el fin de prevenir estos tipos de alabeos. Este contraste de flexión se puede observar en la **Figura 6-19**.

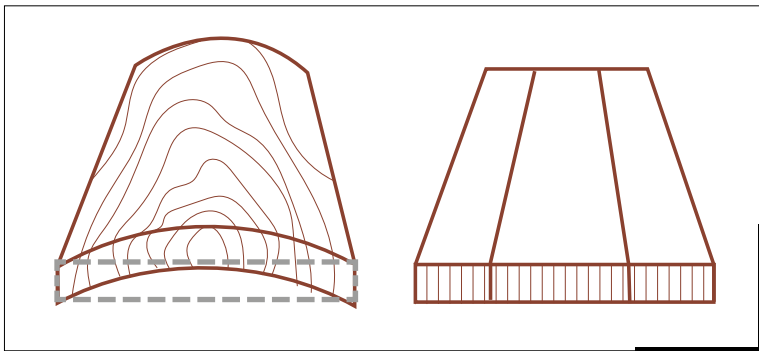


Figura 6-19. Flexión en las tablas anchas y en los listones.
Tomada y modificada de^[36]

Generalmente, los listones se fabrican con sus fibras orientadas a la misma dirección para conformar un elemento que se comporta como una sola unidad estructural, con propiedades mecánicas particulares (dependiendo de los materiales y condiciones del proceso) y superiores a la madera maciza, debido a que se pueden eliminar imperfecciones como grietas, poros, nudos, entre otros.^[37]

Este tipo de tableros se fabrica en dimensiones cuyo ancho puede variar entre 500 y 1.220 mm, largo entre 970 y 6.000 mm y espesores entre 22 y 27 mm; aunque actualmente la dimensión preferida es 1,22 m de ancho por 6 m de largo, debido a su elevado peso. De las dimensiones mencionadas la que más limitación tiene es el grosor, pues comercialmente varía en un rango de 5 mm (22 mm a 27 mm), pero con las máquinas más modernas se pueden conseguir grosores de tableros de 5 a 80 mm.^[36,38]

Los tableros alistonados, al igual que las otras clases de tableros a base de madera, se clasifican en dos tipos de acuerdo con el número de capas que los forman: tableros de tipo monocapa, formados por una sola capa de listones, y tableros multicapa, compuestos por capas impares, generalmente por tres, dispuestas con fibras cruzadas, es decir, en forma longitudinal y transversal, tal como se observa en la **Figura 6-20**.



Figura 6-20. Tablero alistonado multicapa.
Tomada y modificada de^[39]

La conformación de los tableros se realiza comúnmente mediante el método *finger joint*, que consiste en la unión de las caras de los listones (testas) en forma de tipo macho-hembra, con el fin de lograr la unión longitudinal de dos piezas de madera maciza, lo que permite producir piezas (de madera) más largas, con más resistencia, aportada por la unión tipo *finger joint* con el adhesivo, y sin nudos defectuosos o fisuras que puedan disminuir la estabilidad. Este tipo de mecanizados y uniones se observa en la **Figura 6-21**.

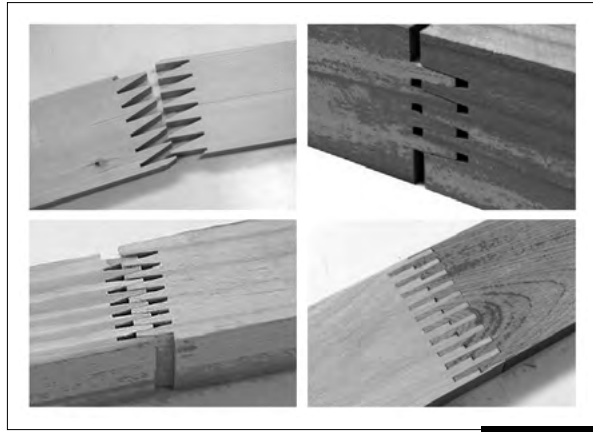


Figura 6-21. Uniones *finger joint*.

Tomada y modificada de^[36]

El proceso de producción típico de este tipo de tableros consta de las siguientes etapas y se observa en la **Figura 6-22**:^[36]

- a. Recepción y secado.** Se almacena la madera húmeda y posteriormente se seca hasta alcanzar el grado de humedad óptimo.
- b. Etapa de alistonado.** La madera se introduce en una máquina de mecanizado para realizar los cortes a las partes que conformarán los listones; luego estas son optimizadas y seleccionadas para realizarles el mecanizado que permitirá la unión, etapa en la que se realiza el mecanizado tipo *finger joint*.

- c. Etapa de prensado.** Se aplica el adhesivo a los listones para preparar su unión; posteriormente se posicionan y alinean para realizar el proceso de prensado y conformación del tablero.
- d. Sección de retestado y empaquetado.** Se hace una selección de los tableros según su calidad; se empacan, se etiquetan y, finalmente, se almacenan.

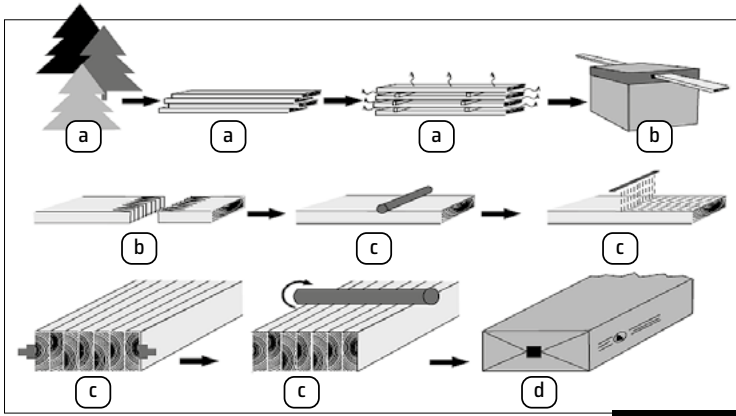


Figura 6-22. Proceso productivo para la fabricación de tableros alistonados.
Tomada y modificada de^[9]

Los adhesivos de uso común para la unión de listones y *finger joint* son de tipo fenólicos y aminoplásticos, adhesivos de poliuretano monocomponente (PUR) que curan a la humedad y adhesivos de polímero en emulsión de isocianato (EPI).^[9,40] Ejemplos de adhesivos fenólicos y aminoplásticos comúnmente disponibles son melamina formaldehído, melamina-urea formaldehído, fenol resorcinol formaldehído y urea-formaldehído. Se utiliza melamina-formaldehído cuando se desean juntas de color claro.^[9]

Se debe tener cuidado respecto a las características naturales de crecimiento y a los defectos de la madera, tales como nudos, desviación del grano, fisuras, deterioro de los bordes, y su efecto sobre las propiedades de las articulaciones. Buenas prácticas de cepillado para producir madera con una perpendicularidad aceptable antes del proceso *finger joint* pueden evitar la desviación de la tracción deseada o las dimensiones de las longitudes

continuas; así, no es necesario un mecanizado posterior.^[40] También, en la etapa de prensado hay que disponer de un sistema que permita sujetar las partes en dirección perpendicular a la aplicación de la presión, con el fin de que los listones no se desordenen y evitar, así, un producto fuera de las especificaciones. Dicho sistema se esquematiza en la **Figura 6-23**.^[37]

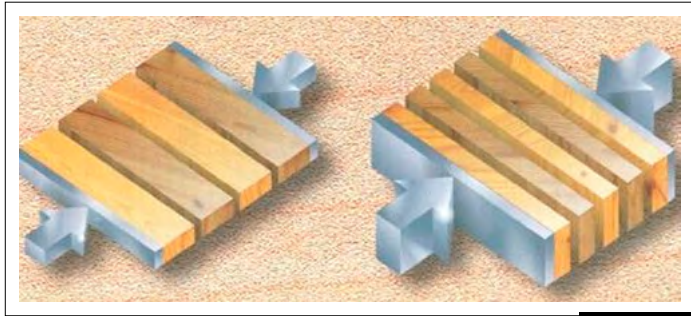


Figura 6-23. Control de posición de listones en etapa de prensado.
 Tomada y modificada de^[37]

La clasificación de los tableros alistonados según la Norma UNE 56770:1992 se muestra en la **Tabla 6-3**.

Tabla 6-3. Clasificación de los tableros alistonados.

Criterio	Tipos
Por las condiciones de exposición.	<ul style="list-style-type: none"> • Tableros alistonados interiores. • Tableros alistonados semiexteriores • Tableros alistonados exteriores.
Por su estado superficial.	<ul style="list-style-type: none"> • Con nudos o sin nudos. • Lijados o no. • Con o sin recubrimiento. • Con o sin elementos entre listones.
Según la unión de sus cantos.	<ul style="list-style-type: none"> • Plano o a tope. • Con unión dentada.
Según la unión de las testas.	<ul style="list-style-type: none"> • Sin uniones en las testas. • En testa plana o a tope. • En testa con unión dentada.

Tomada y modificada de^[36]

Entre las ventajas principales de este tipo de tableros se pueden mencionar:^[41] poseen propiedades deseables tales como rectitud, estabilidad dimensional, intercambiabilidad con madera sin estratificar y longitud ilimitada; ahorra tiempo, operaciones de transformación y utilización de maquinaria; refleja las mismas posibilidades de mecanización propias de la madera; se destaca por su buena insonorización (aislamiento acústico) y brinda protección calorífica; manifiesta posibilidades para barnizar, encerar y teñir.

Las ventajas mencionadas hacen que los productos alistonados sean atractivos para diferentes sectores:^[38,41]

- **Mobiliario.** Partes de muebles, frontales de armarios, cajas, cuberteros, camas, sillas, estanterías, encimeras y mesas, bancos rinconeros, cocinas y mostradores (suelen emplearse especies coníferas).
- **Decoración de interiores y elementos de construcción.** Láminas continuas alistonadas con adhesivo suelen usarse internamente para el mejoramiento estético en los hogares, división de interiores, elementos de decoración, estanterías industriales, elaboración de puertas; incluso, son empleadas a la hora de hacer trabajos de talla o labrado de madera.
- **Habitaciones y locales comerciales.** Comedores, salas de estar y dormitorios, vestíbulos, sótanos, escaleras y altillos, artesanía doméstica, instalaciones interiores en consultorios, talleres, oficinas, hoteles, restaurantes, estands de ferias.
- **Arquitectura.** En los hogares suelen ser de uso externo. Con este tipo de diseño se agregan detalles creativos a los edificios. Las piezas alistonadas multicapa se pueden utilizar como vigas y columnas para construcción de centros culturales, obras públicas, iglesias, escuelas, colegios e instalaciones industriales.

En la **Figura 6-24** se pueden apreciar algunos usos de estos tipos de tableros.



Figura 6-24. Usos comunes de los tableros alistonados.

Tomada y modificada de^[147]

Características identificadas de las especies maderables

La calidad de un tablero alistonado elaborado por *finger joint* depende de las propiedades de la madera y del adhesivo, así como de los parámetros del proceso (temperatura de la madera, geometría *finger*, presión de ensamblaje, tiempo de curado, tipo de adhesivo y pretratamiento de la madera). Ahora bien, el proceso de adhesión está influenciado, entre otras cosas, por las propiedades físicas y anatómicas de la madera (densidad, porosidad, etc.), por la calidad de la superficie después del mecanizado y por la capacidad del adhesivo para penetrar adecuadamente en la madera y curar. En la relación madera/parámetros de unión/adhesivo, estos dos últimos son más fáciles de controlar que el primero, por lo que es muy importante ajustar los valores a las características de la madera que se está utilizando.^[42]

Este tipo de tableros es el único entre los estudiados donde las propiedades de la materia prima son considerablemente iguales a las del producto final, por lo que parámetros como densidad, estabilidad dimensional, aislamiento acústico, reacción al fuego, conductividad eléctrica y térmica dependen únicamente de la especie maderable utilizada y de su respectiva constitución.^[36,38]

- **Contenido de humedad.** Las piezas de madera cortadas de troncos deben tener un contenido de humedad en el intervalo de 6% a 15% para tableros sin tratar y de 11% a 18% para tableros tratados con conservante, con el fin de permitir una buena unión en el proceso de laminación posterior.^[40] También es aconsejable un contenido de humedad uniforme dentro del lote de secado para minimizar cualquier tensión de secado y evitar heterogeneidad en las dos partes que se van a articular, por lo que se sugiere que la variación del contenido de humedad entre las partes sea inferior al 5%.^[42]
- **Contenido de resinas.** Es un factor que se debe tener en cuenta en el encolado con resina, cuya cantidad óptima se encuentra entre 150 g/m² y 200 g/m²; mayores o menores cantidades pueden perjudicar la unión de la madera con el adhesivo. También se debe tener cuidado con la cantidad de sólidos en suspensión, ya que esto se encarga de disminuir la resistencia del adhesivo.^[43]

2. Materiales compuestos

Los compuestos aprovechan las propiedades de dos o más materiales (metales, cerámicos y polímeros). Al ser combinados (insolublemente) y unidos de ciertas maneras y en proporciones adecuadas, forman un nuevo material con propiedades diferentes a las de los constituyentes, usualmente superiores a las de los materiales base. Así, pueden lograrse combinaciones de propiedades que son difíciles de obtener en materiales convencionales, tales como gran firmeza y alta resistencia a la tracción. Generalmente, los constituyentes se combinan en dos fases, tales que las debilidades de uno de ellos se compensan con las fortalezas del otro, mejorando así el desempeño global del compuesto obtenido.^[44]

A continuación se tratarán dos de los compuestos que mayor desarrollo tienen en la industria, y en los que actualmente más esfuerzos se invierten en el campo de la investigación; son los materiales compuestos a base de matrices cerámicas y a base de matrices poliméricas, cuya diferencia radica principalmente en que los segundos (PMC) se utilizan para mejorar la resistencia a la fractura, mientras que con los primeros (CMC) el objetivo es proporcionar alta resistencia y mayor rigidez.^[45]

Compuestos a base de matriz cerámica (CMC)

La aplicación de materiales compuestos de matriz cerámica data de tiempos remotos; los egipcios conocían el adobe, que consistía en una mezcla de fibra de paja en una matriz de arcilla (con agua) para dar una pasta moldeable de la que se hacían ladrillos con la forma deseada.^[46] Hasta la década de los 70, los materiales compuestos se habían definido como la “asociación” de una matriz con fibras de refuerzo. En los 80 se acordó utilizar “efecto de sinergia”, que se convirtió en parte fundamental de su definición. La obtención de CMC buscaba desarrollar elementos de fibras de refuerzo que resistieran principalmente las altas temperaturas. En 1891 se desarrollaron las SiC de Nicalon (carburo de silicio-fibras de alto punto de fusión) para solucionar el problema presentado por las fibras de bajo punto de fusión, que son destruidas por las altas temperaturas de procesamiento requeridas para sintetizar la cerámica; de este modo, el desarrollo de las SiC fue una aplicación importante y pionera en el procesamiento actual de los CMC.^[47]

Los compuestos de matriz cerámica combinan las principales características del material cerámico, tales como dureza y rigidez, resistencia (a la compresión, al desgaste y a la corrosión) y estabilidad química incluso a altas temperaturas, con las propiedades de las fibras que constituyen la fase de refuerzo para compensar aspectos como la fragilidad, propiedad mecánica de baja representación en los materiales cerámicos puros.^[45,48-50] Se sabe que la cerámica como tal es frágil y que necesita una fase de refuerzo que le añada dureza; en este caso, las fibras actúan como puentes sobre las grietas que se generan, proporcionando una fuerza de compresión y absorbiendo parte de la energía de propagación de las aberturas alrededor de la matriz. Este es el efecto de compensación de propiedades que se busca con los materiales compuestos.^[47]

La fase de refuerzo de los CMC puede obtenerse de elementos en distintas formas, tales como partículas, fibras, láminas y hebras (dicha tipología se muestra en la **Figura 6-25**). Comercialmente, los CMC han sido reforzados a partir de diferentes materiales, entre los cuales se destacan las fibras naturales, los residuos volcánicos y los residuos procedentes de la extracción de los metales, entre ellos oro y plata.^[48,50,51]

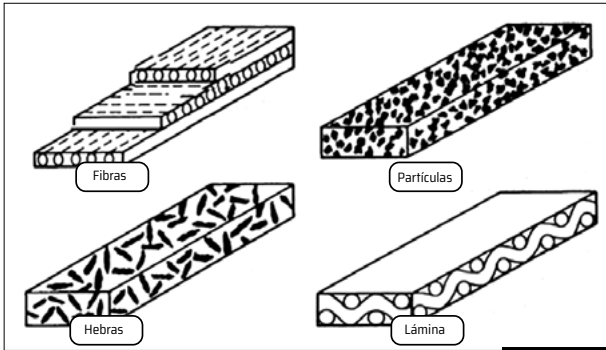


Figura 6-25. Tipos de refuerzo de los CMC.
Tomada y modificada de^[45]

Industrialmente se producen en mayor cantidad CMC constituidos a partir de carburo de silicio reforzado con fibra de carbono (C/SiC), CMC de carbono reforzados con fibra de carbono (C/C) y también compuestos de carburo de silicio reforzados con fibra de carbono de silicio (SiC/SiC). Estos compuestos representan una clase de materiales cerámicos caracterizados por buenas propiedades mecánicas, estabilidad termomecánica y tenacidad a la fractura.^[52]

Los principales usos de los CMC se dan donde existen condiciones de gran desgaste abrasivo (por ejemplo, hidrociclones y revestimientos antiabrasivos). También se han desarrollado aplicaciones en el mercado de los motores térmicos y en la industria militar (ventanas infrarrojas y radomos militares); incluso, hay países donde se están aplicando en el sector automotor (turbocompresores y bujías de encendido), brazos oscilantes, cámaras de precombustión y construcción (hormigón: mezcla de rocas y aglomerante hidráulico, usualmente cemento y agua); además, se incursiona en sectores dominados por otros tipos de materiales, como el mercado mobiliario.^[45,47-49,51,53] Aplicaciones representativas de los CMC se muestran en la **Figura 6-26**.

Los avances tecnológicos basados en las necesidades industriales han llevado a que otros sectores, como el aeroespacial, inviertan considerablemente en el uso de los CMC, tal y como se observa en la **Figura 6-27**.



Figura 6-26. Sectores y aplicaciones típicas de los CMC.

Tomada y modificada del^[47]

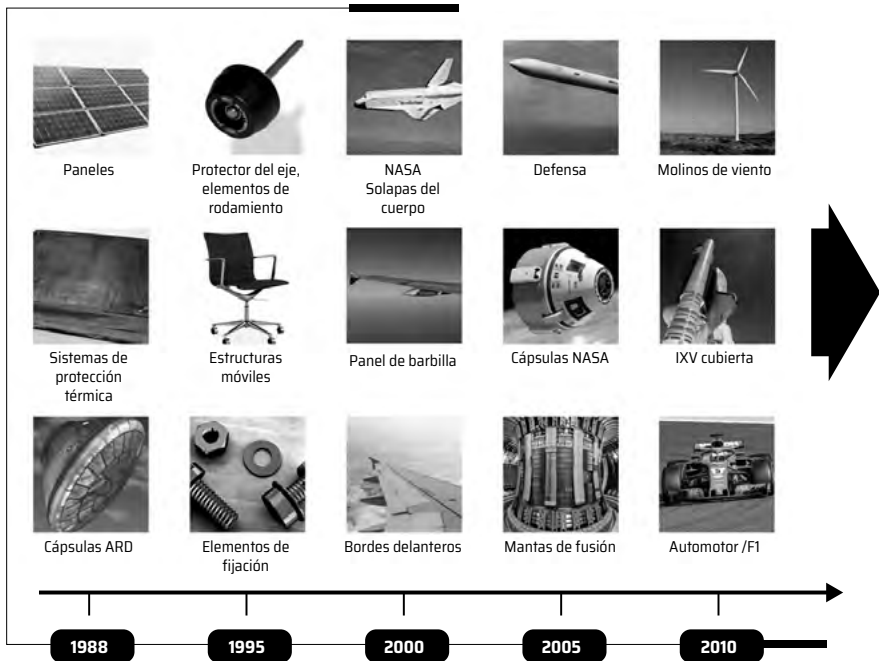


Figura 6-27. Evolución de los CMC en aplicaciones con énfasis aeroespacial.

Tomada y modificada de^[53]

Una aplicación típica de este tipo de compuestos se desarrollará más a fondo en la siguiente sección sobre tableros de madera-cemento.

Tableros de madera-cemento. Los tableros de madera-cemento (WCB's por sus siglas en inglés: *wood cement board*) tienen usos diversos para solucionar las necesidades que no se pueden cubrir con los tableros de madera; en particular, se utilizan en aplicaciones en las que la resistencia a la humedad y al fuego, la fuerza y la inocuidad ecológica e higiénica son necesarias al mismo tiempo.^[54]

Los tableros madera-cemento son un material compuesto conformado por una mezcla de partículas o fibras de madera (denominadas partículas de refuerzo) y cemento comprimido y seco. La mezcla resultante se forma en hojas o alfombras continuas, apiladas (o prensadas), secadas y recortadas a determinadas medidas.^[55] Elementos típicos para la construcción de estos tableros se muestran en la **Figura 6-28**.



Figura 6-28. Materia prima para compuestos madera-cemento.
A. Fibras de madera. B. Cemento Portland. C. Partículas de madera.
Tomada y modificada de^[147]

Estos tableros combinan la flexibilidad de la madera con la durabilidad, la resistencia a la humedad y la prevención de la degradación biológica de la fibra vegetal que otorga el cemento. La combinación exitosa depende de la comprensión de las interacciones químicas existentes y del rendimiento resultante.^[55]

Entre las ventajas destacables de este tipo de compuestos se encuentran:^[54,56] no son tóxicos, no contienen compuestos volátiles peligrosos y son libres de sílica, asbestos y formaldehído; son un buen aislante acústico debido a su alto peso y son resistentes a la flexión (por lo que pueden

ser utilizados como un elemento estructural en el suelo y como soporte del techo); tienen buena absorción acústica, alta resistencia al fuego y a los parásitos, hongos, termitas o cualquier tipo de insectos; son impermeables al agua, no se desagregan bajo la acción de esta; tienen buenas propiedades de resistencia térmica, lo que significa que pueden funcionar como aislantes en temperaturas frías y calientes; tienen buena durabilidad natural y mejores propiedades en cuanto a resistencia a la humedad, esfuerzos y equilibrio entre ecología e higiene; y se pueden trabajar (cortar, perforar y lijar) con herramientas convencionales de carpintería, lo que no es factible en los tableros comunes de cemento.^[57] Tableros típicos de estos compuestos se muestran en la **Figura 6-29**.

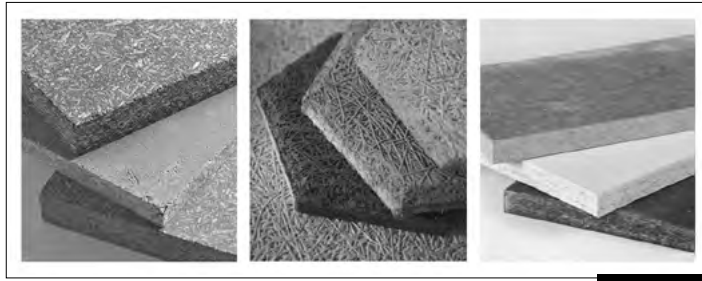


Figura 6-29. Tableros de madera-cemento.

Tomada y modificada de^[147]

El proceso de fabricación de este tipo de tableros se esquematiza en la **Figura 6-30**; se inicia con la recepción y secado de la materia prima, que luego es cortada en trozos a los que se les elimina la corteza. La madera húmeda, el cemento, las sustancias de mineralización y el agua (cuya cantidad se adapta a la humedad medida de la madera) se introducen en un mezclador continuo en diferentes proporciones según el tipo de tablero que se vaya a fabricar. Desde el mezclador, los materiales combinados se transportan a la máquina de distribución, que extiende una capa continua de material sobre moldes. La estructura del panel se forma por la aplicación de altas presiones en la mezcla hasta el espesor nominal (aproximadamente

1/3 del espesor aparente a granel) durante dos o tres minutos, tras las cuales se fragua el cemento. Los paneles pasan al almacén de maduración para su curado, como mínimo siete días, para luego ser secados y dimensionados según los requerimientos.

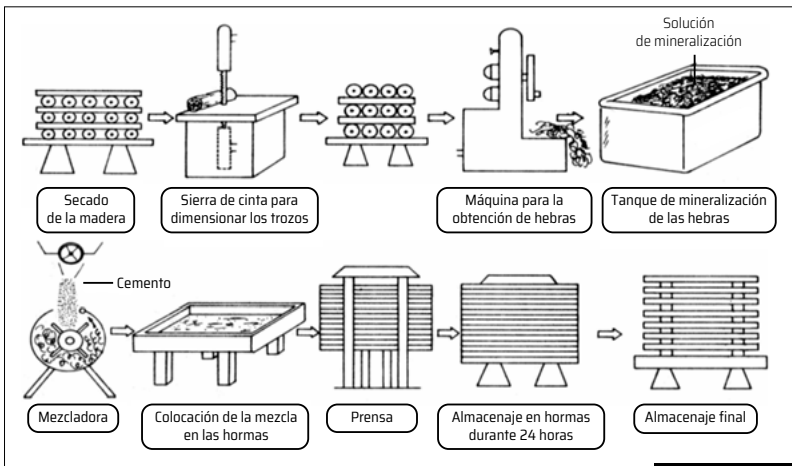


Figura 6-30. Esquema del proceso de fabricación de fibro-cemento.

Tomada y modificada de^[54]

Varios autores proponen diferentes aplicaciones: uso en placas de los falsos techos y como elementos de relleno en las cámaras aislantes,^[29] en encofrados, cubiertas, paneles tipo sándwich, casas prefabricadas, suelos de gran tránsito, tabiques-particiones y puertas resistentes al fuego; también en la construcción de viviendas de bajo costo, y como aislantes acústicos, revestimientos de fachadas, paneles publicitarios, etc.^[54]

El uso de tableros cemento-madera en la industria de la construcción se está incrementando debido a la disponibilidad de la materia prima y a los beneficios económicos que se obtienen con su producción, que aunque requiera una alta inversión inicial, muestra ahorros de costos, tiempo y espacio, factores que pueden hacer que los compuestos cementados unidos sean superiores a los convencionalmente unidos. La **Figura 6-31** muestra la utilización de estos tableros en el campo de la construcción.



Figura 6-31. Fachada de una casa elaborada con tableros madera-cemento.
Tomada y modificada de^[58]

Es posible la utilización de distintos tipos de cementos para la producción de tableros. Entre los más comunes, y sobre los que se han realizado más estudios, están el cemento Portland y el de magnesio. El primero es de uso más común y se caracteriza por la gran solidez que aporta (en tableros tanto de baja densidad como de alta densidad); los aglutinados con magnesita aceptan más agua en la fabricación, por lo que pueden usarse lignocelulosas menos dóciles y emplearse en cielo y paredes mezclados con lana de madera, similar a los fabricados en cemento Portland de baja densidad.^[8]

En general, se pueden distinguir cuatro tipos de tableros cemento-madera, los cuales difieren principalmente en la geometría/tamaño de las partículas de madera, en los tipos de aglutinante mineral utilizado y en la densidad obtenida en el producto final.^[59] En la **Figura 6-32** se puede apreciar su estructura física y en la **Tabla 6-4** se da una breve descripción de cada uno de ellos.

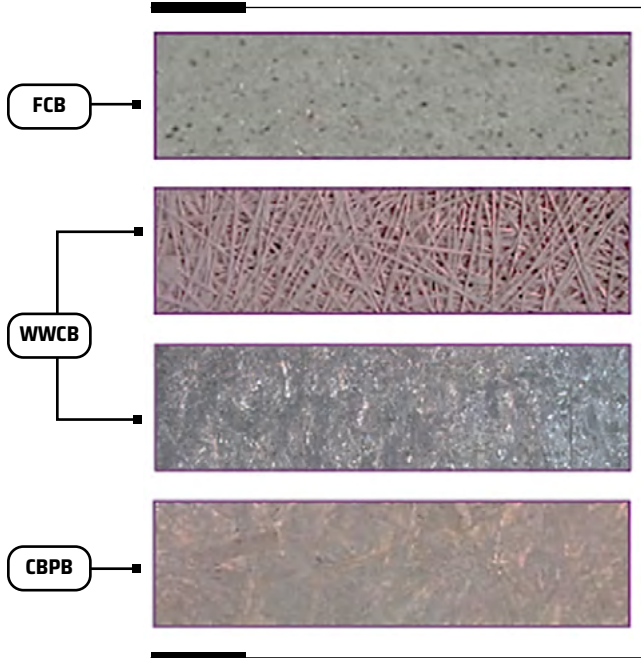


Figura 6-32. Tipos de tableros de madera-cemento.
Tomada y modificada de^[59]

Tabla 6-4. Tipos de tableros de madera-cemento.

Tipo de tablero	Descripción
Fibro-cemento <i>Fibre cement board (FCB)</i>	Consta de cemento, agua, sílice, harina de piedra caliza y fibras, las cuales pueden ser recicladas, sintéticas o de pulpa celulósica. Es adecuado tanto para aplicaciones internas como externas, incluyendo ventanas y fachadas, techos, revestimientos, paredes externas y de división, tabiques, suelos, revestimientos de suelos y revestimientos de azulejos, como consecuencia de su resistencia al fuego, humedad y descomposición, y a su fácil trabajabilidad gracias a su bajo peso.

Continúa en la siguiente página.

Continuación de la Tabla 6-4.

Tipo de tablero	Descripción
<p>Lana de madera-cemento</p> <p><i>Wood wool cement board (WWCB)</i></p>	<p>Elaborado con fibras de lana de madera, cemento, agua, una solución de sal y aditivos (opcional) para mejorar ciertas propiedades. El WWCB se caracteriza por ser una matriz abierta y tener densidad muy baja (entre 350 y 570 kg/m³). Es resistente al fuego, a la humedad, a la podredumbre húmeda y seca, a los parásitos, a las termitas y al hongo. Se utiliza sobre todo internamente para la decoración, aislamiento (termal y acústico), y también encuentra aplicación en el encofrado permanente y el techado.</p>
<p>Partículas aglomeradas</p> <p><i>Cement bonded particle board (CBPB)</i></p>	<p>Realizado con una mezcla de cemento (60%), partículas de viruta de madera (20% en peso seco) y agua (20%). Tiene una densidad típica de entre 1.250 y 1.400 kg/m³. Posee propiedades de expansión y retracción relativamente altas cuando se expone a la humedad debido a su alto contenido de madera. También tiene un alto nivel de resistencia al fuego y se emplea para casas prefabricadas, en tejas, paredes exteriores y tabiques, fachadas y revestimientos.</p>
<p>Virutas aglomeradas</p> <p><i>Wood strand cement board (WSCB)</i></p>	<p>La mezcla básica necesaria para producir WSCB es muy similar a la del WWCB, pero requiere el uso de una prensa de sujeción adicional para aplicar una presión mayor y producir un tablero de densidad más alta. Presenta una densidad media de 1.100 kg/m³. Significativamente, las fibras de madera en WSCB son más delgadas y más anchas que las utilizadas en la producción de WWCB. Tiene alta resistencia a la flexión y elasticidad, al fuego, a la humedad, a los hongos, a los bichos y a la congelación-descongelación, y es relativamente fácil de manejar debido al bajo peso.</p>

La oportunidad de expansión en esta industria es evidente, ya que se cuenta con disponibilidad de materias primas y hay una gran necesidad de productos para la construcción, duraderos, resistentes y con bajo contenido de carbono. Esto último es un incentivo importante, considerando que las políticas ambientales son cada vez más estrictas; así que el tablero madera-cemento es una excelente alternativa para reemplazar los paneles convencionales a base de madera u otros materiales de construcción en aplicaciones específicas. No obstante, el problema principal en la producción de compuestos de madera-cemento es la incompatibilidad química existente entre ellos,

ya que algunos componentes de la madera, principalmente extractivos y polisacáridos, afectan las reacciones de hidratación del cemento e inhiben su fijación y endurecimiento; el resultado son tableros de baja calidad, con menor resistencia mecánica en comparación con el cemento limpio.^[60,61]

Aunque existen tecnologías emergentes para mejorar la compatibilidad madera-cemento mediante la adición de químicos inorgánicos conocidos como aceleradores, útiles para disminuir el tiempo de curado del cemento: CaCl_2 , MgCl_2 , Na_2SiO_3 , $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, o por extracción acuosa para remover las sustancias inhibitorias de la madera antes de mezclarla con pasta de cemento,^[62,63] es de suma importancia una evaluación previa de la composición química de los componentes de un árbol de las especies maderables que se van a utilizar, así como del contenido de corteza, de la relación maderamento y de las condiciones de almacenamiento de la madera, ya que influyen en la compatibilidad.^[60] La compresión y la confirmación de las cualidades inhibitorias de las especies de madera antes de la fabricación son importantes para mantener la estabilidad de los WCB, mejorar la utilización de la madera y reducir los residuos y el costo de la producción.

Características identificadas de las especies maderables

- **Composición química de la especie.** La incompatibilidad de algunas especies se debe a la presencia de componentes químicos en la madera que inhiben el fraguado y endurecimiento del cemento. Estos componentes son azúcares, hemicelulosa y sustancias fenólicas tales como taninos, extractivos y otras sustancias solubles en agua. Los compuestos extractivos pueden retrasar la hidratación de los aglutinantes inorgánicos, afectando así la morfología y tamaño de los cristales de hidrato. Como consecuencia, pueden afectar la adhesión de aglutinantes inorgánicos a la madera; así mismo, reducen la liberación de calor y prolongan el tiempo de fraguado del cemento Portland, medido por el calor de hidratación emitido durante la fijación del cemento.^[64]

Los ácidos orgánicos, tales como el ácido tánico acético y otros compuestos fenólicos, no solo pueden inhibir la hidratación del cemento, también atacar y destruir lentamente el enlace de cemento; el resultado

será una reducción en los valores de resistencia del tablero y una afectación de otras propiedades del mismo.^[64]

Bajos contenidos de hemicelulosa en las especies maderables son preferibles para evitar incompatibilidades y efecto inhibitorio sobre la hidratación del cemento. Azúcares en concentración baja, como 0,03% a 0,15% en peso en cemento, retardan el tiempo de fraguado y afectan la resistencia de este.^[65]

- **Especie de madera.** Algunas especies, como píceas y abetos, normalmente no causan problemas severos durante la hidratación del cemento. Pero factores como el hábitat, el tiempo de cosecha y otros influyen en la compatibilidad de la madera y el cemento.^[63]

Se reporta que los porcentajes de sustancias inhibitorias (especialmente xilano soluble y otras sustancias extractivas) son más altos en especies de maderas duras que en especies de maderas blandas, lo que explica por qué estas últimas son más compatibles con cemento que las primeras y afectan en menor grado la resistencia a la tracción y el comportamiento exotérmico del cemento.^[63]

Defo *et al.* realizaron experimentos para conocer la compatibilidad de diferentes especies y evidenciaron que la edad de las muestras tiene influencia significativa, debido a que el envejecimiento puede modificar el contenido de extractivo, así como la composición química porque se oxidan con el tiempo.^[66]

- **Contenido de extractivos.** Valenzuela estudia la influencia del contenido de extractivos de la especie de madera en la elaboración de tableros fibro-cemento, afectando el proceso de fraguado.^[54] En su análisis utiliza dos métodos de extracción: el uno en agua caliente y el otro en alcohol benceno; y obtuvo resultados favorables para contenidos menores de 3,25% y de 2,23%, respectivamente. Añade el mismo autor que una especie medianamente apta tiene un contenido menor de 4,26% y de 3,61% para los mismos métodos. Por lo tanto, se deduce que a un mayor contenido de extractivos, menor es la afinidad (aptitud) de las maderas para conformar tableros de fibro-cemento.^[54]

Se espera que las especies con un bajo contenido de extractivos solubles en agua sean aptas para formar una unión con cemento deseable

y aceptable. Hachmi y Moslemi consideraron que las especies que contienen más de 7% de extractivos solubles en agua caliente pueden considerarse incompatibles.^[68]

- **Control de pH.** Otro factor que afecta la compatibilidad de la madera con aglutinantes inorgánicos es el pH de la madera. Extractivos de madera con pH bajo pueden inhibir la cristalización del cemento mucho menos que aquellos con alto pH; esto se debe probablemente a la falta de reacciones complejas de iones de calcio con extractivos ácidos, lo que resulta en un efecto menor sobre el nivel crítico de la concentración de dichos iones requerida para la cristalización del cemento.^[68]

Las especies con un pH superior a 4,9 se consideran incompatibles y aquellas con un pH inferior a 3,9 se consideran compatibles.^[69] Entre estos dos límites una especie podría ser compatible con cemento o no dependiendo de la magnitud de otras variables.

- **Porcentaje de madera en la mezcla de cemento.** Generalmente, las fibras lignocelulósicas se añaden en el intervalo del 5% al 15% en peso en la mezcla con cemento,^[69] y la adición causa dificultades en la mezcla y la compactación. Sin embargo, este parámetro puede cambiar de un referente a otro, así que Vaickelionis sugiere que los paneles cemento-madera pueden contener aproximadamente del 3% al 70% de madera en diversas formas.^[65] Vignote propone que el porcentaje de la madera sea del 25% de su peso en relación con el total de producto.^[70] En el caso de Cetrís, empresa de República Checa, se utiliza una mezcla con un 63% de volumen de chips de madera, un 25% de volumen de cemento Portland, un 10% de volumen de agua y un 2% de volumen de aditivos para mejorar las propiedades de hidratación.^[57] Esto permite concluir que este porcentaje aún no ha sido claramente determinado y que deben realizarse estudios más exhaustivos para esclarecer el rango adecuado.
- **Geometría de las hebras (*wood wool*).** Valenzuela y Cruz han obtenido resultados favorables con hebras a partir de una cepilladora (de 20 a 30 cm de longitud, de 1 a 2 cm de ancho y de 0,5 cm de espesor aproximadamente).^[54]

Krivaja Homes, empresa de la República de Bosnia y Herzegovina especializada en la obtención de tableros para la industria de la construcción,

ha desarrollado el proceso de fabricación de tableros de madera-cemento a partir de lana/hebras de madera (*wood wool*), los llamados WWCB; para estos define las hebras como una banda de 0,2 a 0,5 mm de espesor, con ancho entre 3 y 5 mm y longitud mayor de 25 cm.^[58]

- **Obtención de virutas.** Geometría con anchos de 2 y 3 mm y largos superiores a 80 mm, entrelazadas paralelamente en la superficie del tablero y recubiertas con un acabado superficial.
- **Geometría de las partículas.** Las partículas se suelen obtener de madera de coníferas en forma de astillas, cuya longitud varía entre 10 y 35 mm y su espesor entre 0,2 y 0,35 mm, según se utilicen en el centro o en las caras del tablero.^[71]

Compuestos a base de matriz polimérica (PMC)

El empleo de las fibras naturales como relleno en matrices poliméricas se remonta a principios del siglo XX con la utilización de materiales derivados del textil. Al rededor de 1903, por ejemplo, la mayoría de los asientos de los aviones y tanques del *fuel* estaban hechos de fibras naturales y una pequeña cantidad de material polimérico. En 1908 aparecieron los primeros materiales compuestos de fenol-formaldehído y papel o algodón como refuerzo para la fabricación de tuberías.^[72]

Los PMC se dividen en dos categorías de acuerdo con su aplicación final: plásticos (compuestos) reforzados y compuestos avanzados; la diferencia está en el nivel de propiedades mecánicas (generalmente fuerza y rigidez) y costo, ya que los primeros consisten típicamente en resinas de poliéster fortalecidas con fibras de vidrio de baja rigidez (han estado en uso y aplicaciones por más de 40 años), mientras que los segundos consisten en combinaciones de fibras y matrices que proporcionan una resistencia y rigidez superiores (han estado en uso por solo 15 años).

También pueden clasificarse de acuerdo con el tipo de polímero usado en su matriz: termoestable o termoplástica; en los primeros se incluyen poliéster, ésteres vinílicos, epoxis, bismaleimidias y poliamidas, que se usan comúnmente en plásticos reforzados con fibra; mientras que los compuestos de matriz termoplástica incluyen poliéster, polieterimida, poliamida imida, éter de polifenileno, poliéster éter cetona y polímeros de cristal líquido.^[45]

La **Tabla 6-5** muestra una comparación entre las propiedades de las matrices termoestables y termoplásticas.

Tabla 6-5. Comparación de las características de las matrices termoestables y termoplásticas.

Tipo de matriz	Temp. del proceso	Tiempo del proceso	Uso de temp.	Resistencia al solvente	Tenacidad
Termoestable	Bajo	Alto	Alto	Alto	Bajo
Termoplástica	Alto	Bajo	Bajo	Bajo	Alto

Tomada y modificada de^[45]

Los PMC se fabrican con fibras (minerales, de vidrio, carbono y aramida), también con recursos petrolíferos no renovables; sin embargo, las preocupaciones ambientales han ayudado a la sustitución de las fibras sintéticas por fibras naturales, de tal forma que los materiales pueden ser reforzados a partir de especies vegetales (bambú, algodón, lino, cáñamo, yute, sisal, kenaf, henequén, abacá, piña, coco, ramina, cascarilla de arroz) utilizadas para elaborar biomateriales compuestos; asimismo, se han utilizado partes de las plantas del plátano para la fabricación de dichos biomateriales.^[73]

Actualmente, la elaboración de materiales compuestos con una matriz polimérica reforzada con fibras o partículas, en algunos casos, es realizada con materiales reciclados, ya sea para la propia matriz polimérica o para la fuente del material reforzante; de igual modo, el uso de material reciclado es una de las opciones encontradas para reducir el impacto medioambiental y ha tenido una gran acogida en la industria, pues ha permitido obtener productos con propiedades útiles y aplicables, reduciendo al mismo tiempo los costos de producción.^[74]

Las propiedades destacables de este tipo de compuestos están en las ventajas productivas (facilidad de adquisición y menos costos de procesamiento), físicas (baja densidad, características de aislamiento y resistencia estructural), bioquímicas (inocuidad y biodegradabilidad), entre otras;^[73] además, los PMC están diseñados para que las cargas mecánicas a las que se somete la estructura en servicio estén soportadas por el refuerzo; aquí

la función principal de la matriz es unir las fibras entre sí y transferir cargas entre ellas.^[45]

Las aplicaciones típicas de los PMC incluyen productos del sector mobiliario, inmobiliario, automotor, aeronáutico comercial y militar, construcción, deportes, electricidad y otros.^[45,75] Ejemplos típicos de aplicaciones de los PMC se muestran en la **Figura 6-33**.



Figura 6-33. Sectores y aplicaciones típicas de los PMC.
Tomada y modificada de^[147]

Además, emergen tendencias hacia nuevos mercados potenciales que incluyen implantes médicos, tecnología industrial alternativa (componentes como rotores de centrífuga, máquinas de tejido, herramientas de mano y brazos de robot), impresión 3D, almacenamiento y transporte de productos químicos corrosivos, vehículos y armas militares, construcción de puentes y edificios; más aún, tienen gran potencial en aplicaciones del sector aeroespacial (estaciones espaciales y aeronaves espaciales).^[44,45,76,77] En la **Figura 6-34** se muestran ejemplos de aplicaciones en tendencia de los PMC.



Figura 6-34. Sectores de aplicación en tendencia de los PMC.
Tomada y modificada de^[147]

Una aplicación típica de este tipo de compuestos se desarrollará más a fondo en la siguiente sección.

Compuestos madera-plástico

Los materiales compuestos de madera y plástico, denominados WPC por sus siglas en inglés (*wood plastic composite*), están formados básicamente a partir de dos fases: una plástica llamada matriz y otra denominada de refuerzo, tal y como se observa en la **Figura 6-35**. La función de la matriz polimérica es transmitir los esfuerzos al material de refuerzo (material particulado *sawdust*/fibras) por medio de la interfase, que es el límite entre la fibra y la matriz; también protege al material de refuerzo de esfuerzos de compresión, humedad, ataques químicos, etc.^[78]

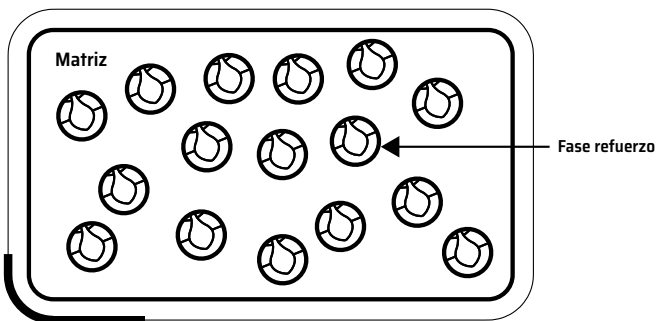


Figura 6-35. Fases de un compuesto WPC.
Tomada y modificada de^[78]

En general, los WPC consisten en una mezcla de subproductos de madera (aserrín, fibras celulósicas y harina de madera) y polímeros de grado industrial, tales como polietileno, polipropileno y cloruro de polivinilo, mezclados con aditivos (lubricantes, agentes de acoplamiento, pigmentos, antioxidantes, estabilizantes UV, agentes antimicrobianos, etc.), los cuales ayudan a adaptar el producto final al objetivo de la aplicación. Las fibras celulósicas (o madera en este contexto) son típicamente fibras (fibra de celulosa blanqueada o fibra natural) o polvo (partículas pequeñas) provenientes de residuos del sector maderero, vírgenes o reciclados.^[78,79] La **Figura 6-36** muestra los tipos de materia prima utilizados para la fabricación de WPC, elaborados en una variedad de colores, formas y tamaños, y con diferentes texturas de superficie.



Figura 6-36. Materia prima para elaboración de WPC.
Tomada y modificada de^[147]

Con esta fusión de materiales se busca aumentar la rigidez del plástico y mejorar las propiedades de compresión y flexión (resistencia a la trituration), así como la absorción de agua (eliminación de burbujas de aire dentro del compuesto) y la resistencia frente al deterioro y ataque biológico característico de la madera sólida, lo que resulta en menores requisitos de mantenimiento. Algunas de estas cualidades se observan en la **Figura 6-37**, en la cual se notan mejoras en las propiedades de resistencia a la flexión.

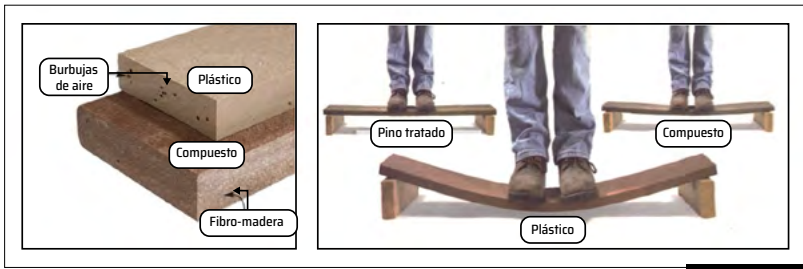


Figura 6-37. Ventajas de los WPC respecto a los materiales de composición.
Tomada y modificada de^[80]

Los WPC ofrecen una serie de beneficios: reducción de la “huella de carbono” de los plásticos al requerir menos energía fósil y materia prima para hacer el producto final; reciclaje de material, debido a que el material recuperado puede fundirse y volver a formarse; y sostenibilidad, debido a que las partículas de madera son predominantemente un subproducto del aserradero y otras corrientes de desechos de procesamiento de la madera, y a que gran parte del plástico se deriva de los esfuerzos de reciclaje de consumidores e industriales. Sin embargo, suelen ser bastante pesados y no tan rígidos como la madera maciza, lo que limita su uso en muchas aplicaciones estructurales y crea el potencial de fluencia o problemas de flacidez, especialmente en un ambiente cálido.

Los WPC se dividen en varios grupos de acuerdo con sus materiales de conformación; así, el primer grupo está conformado por compuestos a base de madera que utilizan una resina termoestable como adhesivo, mientras el segundo comprende los materiales compuestos termoplástico-madera y los materiales compuestos con matrices termoestables. La clasificación se muestra en la **Figura 6-38**.^[78]

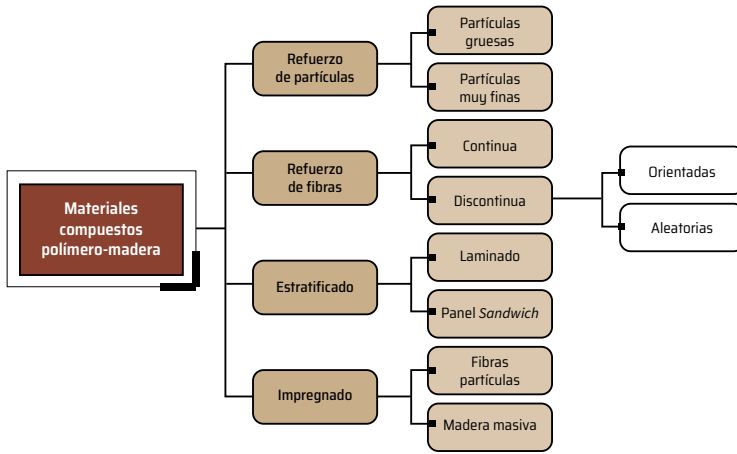


Figura 6-38. Clasificación de los materiales compuestos madera-plástico WPC. Tomada y modificada de^[78]

En la Figura 6-39 se observa el flujo de proceso típico de fabricación de compuestos WPC mediante extrusión.

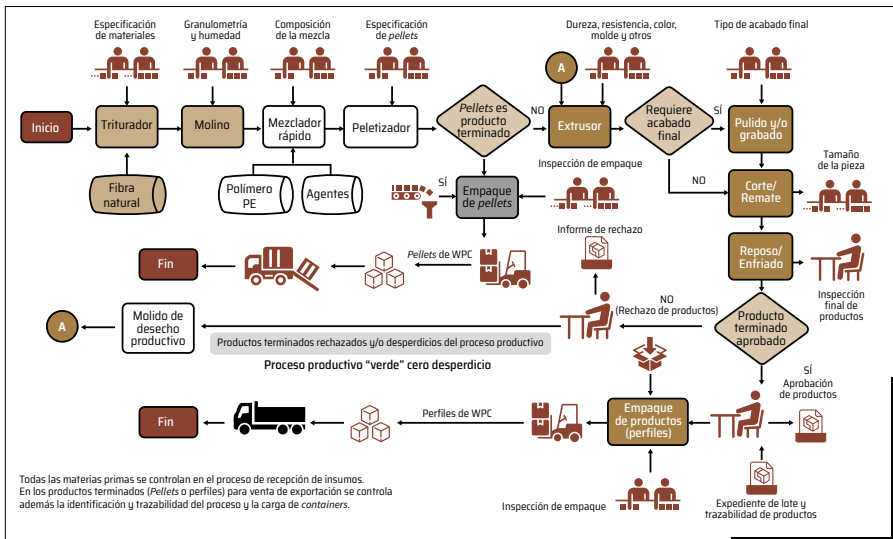


Figura 6-39. Flujo de proceso de producción de los WPC utilizando técnica de extrusión. Tomada y modificada de^[81]

Entre las propiedades más destacables de un WPC se encuentran:^[82,83]

- Impermeable. No deja pasar el agua ni la humedad.
- Anticorrosivo. No se deteriora bajo la acción de productos químicos.
- Imputrescible. No se pudre al aire ni en contacto con arena o agua.
- Resistente a la intemperie bajo cualquier condición morfológica.
- Buena resistencia mecánica, material duradero.
- Higiénico, inmune a microorganismos, roedores e insectos.
- Piroresistente. Alta resistencia ante conflagraciones.
- Seguro. No se agrieta ni produce astillas.
- No se descompone, deforma o desastilla.
- No es necesario aplicarle pintura.
- Aumento de la rigidez, con bajos costos de producción.

Las principales aplicaciones de los WPC están enfocadas en el sector de la decoración y las barandillas (dos tercios de su producción se dedican a estos dos), que incluyen productos mobiliarios (mesas de picnic, bancos, gazebos, partes de escritorios), recubrimiento de superficies que se encuentran a la intemperie (patios, muelles, terrazas, cercas de piscinas), elementos para cercado (barandillas, cerramientos, techumbres, cercas residenciales).^[84,85] El resto de la producción suele utilizarse en artículos tan variados como manillas de puertas y ventanas, pasarelas, mangos de cuchillería, herramientas, paneles para equipos eléctricos, moldes, rodillos;^[86] además, se presenta especial interés en el desarrollo de perfiles extruidos (puertas y ventanas) y en la industria automotriz (paneles interiores de puertas, espaldares de asientos, apoyacabezas, guardafangos, bandejas para guardar objetos). Algunas de estas aplicaciones se muestran en la **Figura 6-40**.^[78]



Figura 6-40. Aplicaciones típicas de los WPC.
Tomada y modificada de^[147]

La motivación actual de la industria química para desarrollar procesos más limpios y “compuestos verdes”, amigables con el medio ambiente, renovables y biodegradables, ha generado un creciente interés por la producción de compuestos reforzados con fibras vegetales, que permitan maximizar la eficiencia del uso de materias primas y minimizar la creación de residuos.

Características identificadas de las especies maderables

Los elementos de madera utilizados en compuestos poliméricos tienen una gran variedad de formas y pueden usarse solos o en combinaciones. Las propiedades del producto final están determinadas por el tamaño, la forma y las características de las fibras vegetales. En particular, el tamaño de las fibras, la estructura morfológica, las composiciones químicas, la densidad, el espesor, el porcentaje de fibra y la cantidad y tipo de agente de unión (si lo hay) son importantes para las propiedades de resistencia de los WPC.

- **Especie maderable.** Las especies de madera utilizadas se determinan normalmente por la ubicación geográfica, la disponibilidad y el precio, aun cuando se evidencia que afectan aspectos importantes de la producción de WPC como compatibilidad química y propiedades mecánicas. Las más comunes son el pino, el arce y el roble. Estudios realizados por Bergery y Stark indican que las especies de madera dura proporcionan mejores propiedades de tracción y deflexión térmica en comparación con las maderas blandas, y que la madera de pino ponderosa proporciona la mezcla óptima para mejorar las propiedades mecánicas.^[87]
- **Contenido de lignina y hemicelulosa.** La influencia de los componentes principales de la madera en los compuestos madera-plástico no ha sido todavía estudiada y, por ende, no se tiene conocimiento sobre las condiciones ideales que deben cumplir las fibras para que su efecto reforzante sea el óptimo. Sin embargo, se cree que la lignina, al ser un material fotosensible que se degrada bajo luz UV (se transforma de un material pardusco a otro gris), es responsable de la decoloración de la madera y de los materiales WPC.^[88]

La madera comienza a experimentar cierta deshidratación a temperaturas por debajo o en el punto de fusión de polietileno (110 y 130 °C, 230 y 266 °F). Esto se acompaña de la disminución del grado de polimerización de sus tres componentes principales y de la liberación de sustancias volátiles, que, a su vez, aumentan la porosidad y reducen la densidad del material compuesto resultante. Este no es el único problema asociado a altas temperaturas y presión: la humedad intrínseca de la madera no se evapora bajo estas condiciones, pero al disminuir bruscamente la presión, se produce repentina y violentamente vapor de agua, lo que genera ruptura de los enlaces lignina-hemicelulosa y descomposición en productos acetilados que forman ácido acético, muy reactivo a altas temperaturas y da lugar a corrosión en el equipo.^[88] Este fenómeno es inevitable: la madera contiene aproximadamente entre 40% a 45% de celulosa, 25% a 35% de hemicelulosa y 15% a 30% de lignina.

- **Área superficial.** Un aspecto dependiente de la selección de especies de madera es la microestructura de la propia madera. La superficie efectiva para la interacción con el polímero y el grado de penetración del polímero en la estructura de madera afecta las propiedades del

compuesto. Especies de madera con áreas interfaciales muy altas pueden aumentar la cantidad de enclavamiento mecánico del polímero con la estructura de la madera, es decir, el grado de penetración del polímero dentro de esta.^[89,90]

- **Tamaño de las fibras.** Uno de los parámetros críticos que influyen en las propiedades de resistencia de los WPC es el tamaño de las fibras. Se prefieren fibras cortas y pequeñas debido a que proporcionan un área superficial específica más alta y se distribuyen más homogéneamente en comparación con compuestos con fibras largas; por lo tanto, mejora la compatibilidad de la fibra y la matriz.^[91]

La relación de aspecto en este contexto se da entre la longitud de la fibra y el espesor de la misma, y desempeña un papel importante en el desarrollo de la resistencia de los polímeros no reforzados con fibras naturales y de los productos derivados de la madera, como el papel y el tablero de fibras.^[92] La fibra de madera tiene una relación de aspecto alta, típicamente 10:1 a 25:1. Por ejemplo, muchas fibras de madera tienen una longitud de 3 mm y un ancho de 0,2 mm (relación de aspecto de 15) o una longitud de 10 mm y un ancho de 0,4 mm (relación de aspecto de 25).^[88] Los WPC comerciales se producen generalmente a partir de partículas de harina de madera con una baja relación L/D, cuyo valor oscila entre 1 y 5.^[85,92] Con relaciones más altas existe el potencial para una transferencia de carga más eficaz entre la matriz y las partículas, lo que conduce a mejores propiedades mecánicas tales como resistencia, elongación y energía de impacto, pero podría disminuir la eficiencia en el procesamiento del material en términos de alimentación y dosificación de las fibras en extrusoras.^[85,89]

- **Tamaño de partículas.** La madera utilizada en la fabricación de WPC está en forma de partículas secas con una consistencia pulverulenta, a menudo llamada “harina de madera”. Típicamente, se utilizan partículas de madera entre 0,18 y 2 mm (malla 10 a 80), obtenidas generalmente de desechos de madera que se presentan en forma de aserrín o virutas de cepillo.^[86,90] Las partículas en la harina de madera pueden estar entre 10 y 100 μm de tamaño. La longitud de las fibras de celulosa, usadas como relleno, a menudo está en el intervalo de 20 a 300 μm (0,02 a 0,3 mm).

El tamaño del polvo de madera influye notablemente en la resistencia del material: a menor tamaño de partícula se observa una disminución en la resistencia a la flexión y resistencia al impacto del material compuesto.^[78,93]

- **Contenido de humedad.** Las fibras o partículas secas no se pueden almacenar durante mucho tiempo, ya que corren el riesgo de ganar humedad del entorno para estar en equilibrio con el ambiente, razón por la cual el secado de la madera es el paso potencialmente más cauteloso de la operación de extrusión y debe ser controlado para garantizar la compatibilidad de la mezcla con los polímeros y agentes aditivos, así como el funcionamiento adecuado de la máquina extrusora.

Un problema muy común debido al contenido de humedad de la madera por encima de los límites permisibles es que no conserva la compatibilidad química con los polímeros y puede crear huecos en el producto final, y, por lo tanto, afectar negativamente las propiedades mecánicas. Gardner,^[82] Villamar *et al.*^[93] y Taylor *et al.*^[85] recomiendan que el aserrín o las fibras de madera tengan una humedad que oscile entre 2% y 8% para garantizar y facilitar el mezclado adecuado con el polímero y proporcionar la máxima tasa de salida del extrusor.

- **Inclusión de residuos de madera en la mezcla.** De acuerdo con los estudios realizados por Gardner,^[82] Moreno^[83] y Solís Jara y Lisperguer,^[94] el porcentaje de madera incluido en la mezcla afecta las propiedades mecánicas del compuesto. Con el aumento del contenido de la harina de madera aumenta el módulo de flexión y tracción, la densidad, la temperatura de deflexión térmica, mientras que disminuye la resistencia a la flexión y a la tracción, el alargamiento a la tracción, la contracción del molde y el índice de flujo de fusión.^[90]

Moreno *et al.* refieren que la viscosidad del fluido aumenta significativamente al aumentar el contenido de madera en la mezcla, lo que provoca una dispersión con mayor dificultad de la fibra de madera en la matriz y afecta el proceso de extrusión.^[83] A partir de sus estudios se sabe que la inclusión de la madera presenta resultados favorables para el compuesto en un rango entre 15% y 60% respecto al peso total.

- **Densidad.** Los WPC tienden a ser bastante densos en comparación con la madera regular, por lo que se han empleado diferentes estrategias para reducir el peso; un método es el uso de secciones transversales de perfil hueco.^[82] Vicuña realizó un análisis para las densidades de las maderas empleadas, con resultados satisfactorios en la fabricación de WPC. Concluyó que la densidad del aserrín obtenido para las especies usadas varía en un rango entre 0,40 g/cm³ y 0,815 g/cm³, intervalo en el cual se han obtenido resultados favorables para los WPC.^[78]

3. Compostaje

El compostaje es un proceso biológico aeróbico en el que se descompone el material orgánico biodegradable en un humus estable inocuo en presencia de microorganismos heterótrofos, a temperaturas elevadas (entre 40 y 65°C). Durante el proceso, los microorganismos (bacterias, hongos, actinomicetos y protozoos) consumen el oxígeno y producen calor, CO₂, vapor de agua y un producto sólido conocido como *compost*. También se define como un abono orgánico que se forma por la degradación microbiana de materiales acomodados en capas y sometidos a un proceso de descomposición,^[95] que normalmente amontona el material vegetal de descarte en capas sucesivas, entre las que se intercala un poco de tierra con el objeto de que aporte humedad y gérmenes microbianos para así facilitar la descomposición. Esta disposición se esquematiza en la **Figura 6-41**.^[96]

El proceso se lleva a cabo naturalmente siempre que los organismos de lucha, la humedad, las condiciones aerobias, el material de alimentación y los nutrientes estén disponibles para el crecimiento microbiano; controlando estos factores, el proceso de compostaje puede ocurrir a un ritmo mucho más rápido. Se utilizan residuos orgánicos tales como hojas, rastrojos, zacates, cáscaras, basuras orgánicas caseras, subproductos maderables (aserrín y virutas, cortezas), ramas, estiércoles y residuos industriales de origen orgánico.^[95] En la **Figura 6-42** se muestra un diagrama de flujo para la producción de compostaje.

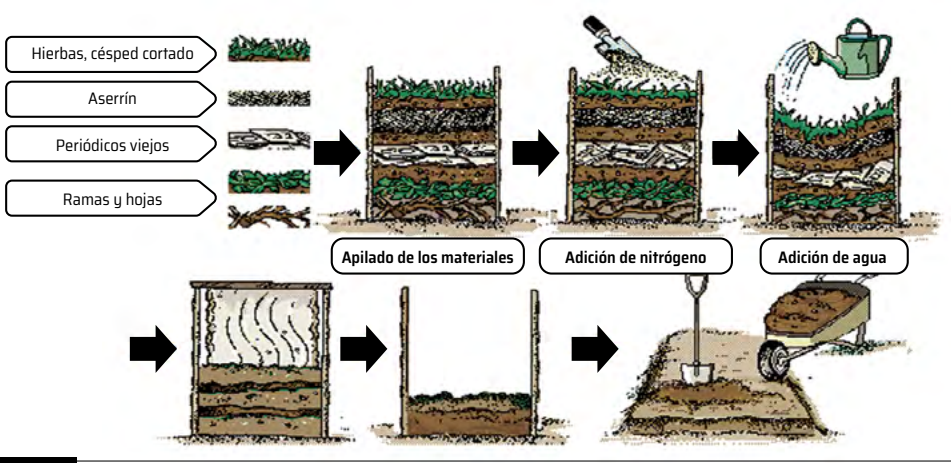


Figura 6-41. Proceso tradicional de biodegradación del *compost*. Tomada y modificada de^[97]

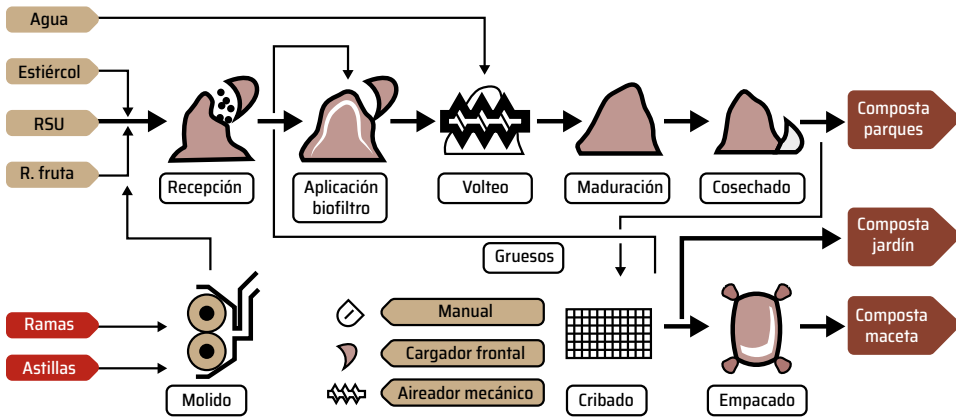


Figura 6-42. Diagrama de flujo para obtención de *compost*. Tomada y modificada de^[98]

El *compost* es una fuente de materia orgánica con una capacidad única para mejorar las características químicas, físicas y biológicas de los suelos, mejorar la retención de agua, la aireación y el drenaje en suelos arenosos, y promover la estructura de suelos arcillosos al aumentar la estabilidad de

los agregados. Estas condiciones mejoran los suelos pobres al aumentar la cantidad de material orgánico y los nutrientes disponibles, lo que da como resultado una condición y un ambiente más saludable para las plantas.^[99-102]

La adición de *compost* al suelo aumenta su fertilidad y la capacidad de intercambio catiónico, y puede reducir los requerimientos de fertilizantes hasta el 50%. La actividad microbiana mejorada también acelera la descomposición de plaguicidas y otros compuestos orgánicos sintéticos.^[101] El *compost* también ayuda en la biorremediación, proceso basado en el uso de reacciones biológicas para degradar los contaminantes orgánicos o para provocar cambios en los contaminantes inorgánicos, de manera que sean absorbidos y tratados con facilidad.^[103] La **Figura 6-43** muestra el *compost* como producto final.



Figura 6-43. Producción de *compost* en la industria.
Tomada y modificada de^[104]

Por ser el aserrín y la corteza residuos biodegradables que pueden llegar a ser un problema en la industria de la madera por los altos volúmenes que se producen, en su mayoría subvalorados porque simplemente son considerados

subproductos de esta operación y no coproductos,^{3[105]} el compostaje se convierte en un proceso atractivo para la reducción de volúmenes y para la generación de ingresos por la venta del *compost*. Adicionalmente, estos residuos tienen un bajo costo y presentan características apropiadas para reducir la actividad de hongos fitopatógenos y mejorar la porosidad, lo que incentiva su uso en la elaboración de *compost* de excelente calidad, con buenas propiedades de enmiendas del suelo, conservación del agua, reducción de la erosión y disminución o eliminación de la necesidad de fertilizantes.^[106]

Características identificadas de las especies maderables

Con el fin de que el proceso de compostaje sea eficiente, la materia prima debe contener compuestos orgánicos biodegradables y suficientes nutrientes para apoyar el crecimiento microbiano. La calidad del producto final depende del tipo de material orgánico utilizado como sustrato y de las condiciones de operación. Idealmente, la materia prima adecuada debe ser material sólido biodegradable basado en carbono recolectado separadamente, que no haya sido mezclado o contaminado con otros desechos, productos o materiales. Por lo tanto, los residuos no tratados deben ser procesados mecánicamente o biológicamente para separar el contaminante indeseable.

Relación carbono/nitrógeno (C/N). Durante el compostaje, los microorganismos requieren energía para llevar a cabo sus procesos vitales y adquirir nutrientes (carbono, nitrógeno, fósforo y potasio), y así poder mantener sus poblaciones.^[107] El carbono y el nitrógeno son las fuentes de energía y de producción de proteínas, respectivamente. Para conseguir un *compost* equilibrado debe prestarse atención a la relación C/N, la cual debe estar en el rango de 25:1 a 35:1 (en peso seco). Esta relación disminuye gradualmente para el producto final debido a que cada vez que los compuestos orgánicos son consumidos por los microorganismos, dos tercios del carbono se desprende como CO₂; el tercio restante se incorpora junto con N en células microbianas y luego se libera para uso posterior una vez que esas células mueren.^[107]

3 Entiéndase como coproductos aquellos residuos que pueden ser aprovechados o reintegrados a la cadena productiva.

Si esta relación es menor de 20:1, se suministraría nitrógeno en exceso, lo que conduce a la formación de NH_3 debido a la utilización total del carbono disponible, lo que causará olores indeseables. Si esta relación es mayor de 40:1, la descomposición del material orgánico se retarda debido a que no hay suficiente nitrógeno para el crecimiento óptimo de sus poblaciones.^[101,102,107]

Para cumplir con dicho requerimiento, en ocasiones es conveniente incorporar fuentes de carbono de lenta descomposición (celulosa y lignina) para optimizar el proceso y la calidad del producto final.^[95] Agregar un ayudante contribuye a mantener la estructura, la aireación, la absorción del exceso de líquidos y la reducción en las pérdidas de nitrógeno.

Contenido de celulosa y lignina. La madera es relativamente resistente a la descomposición debido a la presencia de compuestos orgánicos recalcitrantes, como la lignina, que también resultan en una alta relación C/N; esta resistencia a la degradación puede ser algo mejorada en productos de madera compuestos de conservación y tratados con biocida.^[108]

Los desechos de madera contienen hemicelulosa y celulosa, que se degradan fácilmente, y lignina; estas contribuyen fuertemente a la formación de humus. Así, se prefieren aquellos sustratos que posean, en orden descendente: carbohidratos > azúcares > proteínas > grasas > hemicelulosa > celulosa > lignina. Debido a que la lignina es el componente más recalcitrante de la pared celular de la planta, cuanto mayor sea la proporción de lignina, menor será la biodisponibilidad del sustrato. Se piensa que el efecto de la lignina sobre la biodisponibilidad de otros componentes de la pared celular es en gran medida una restricción física, con las moléculas de lignina reduciendo la superficie disponible para la penetración enzimática y la actividad.

Durante la descomposición, los compuestos fenólicos y los polímeros liberan fenoles bioinhibidores, terpenos y taninos periódicamente, de manera que el proceso de compostaje de desechos de madera es escalonado en lugar de continuo.^[108]

Contenido de taninos. Se ha comprobado que el tanino presente en la corteza del pino es inhibidor del crecimiento de las semillas y de los brotes. Un *compost* bien descompuesto contiene muy poco o nada de taninos. Usualmente, las cortezas pueden llegar a tener un contenido de taninos en el orden del 4% al 8%, dependiendo de la naturaleza de la especie, de las características del suelo y del clima y edad de los ejemplares. Por ello, en el caso de las cortezas, deben ser lixiviadas con agua luego de la molienda para asegurar que el nivel de taninos caiga por debajo del 2% y no genere fitotoxicidad.^[96]

Contenido de humedad. La materia prima usada como sustrato debe contener suficiente humedad para garantizar el crecimiento y adecuado funcionamiento de los microorganismos. El agua es el medio para las reacciones químicas y el transporte de nutrientes, permite que los microorganismos se muevan. El contenido de humedad ideal de la pila de *compost* está entre 50 y 60% en peso. Se debe sentir húmedo al tacto cuando se aprieta un puñado de materias primas mezcladas. Un contenido de humedad por debajo del 40% obstaculiza la actividad microbiana, y esto dificulta la descomposición aeróbica de los residuos sólidos; por encima del 60%, se reducirá la concentración de aire en los poros y conducirá a condiciones anaeróbicas.^[102,108]

En cuanto a desechos de la madera, se pueden utilizar partículas y virutas. Para las primeras, estudios de la Universidad Nacional de Colombia,^[109] la Pontificia Universidad Javeriana^[110] y la Universidad de Wisconsin-Madison^[101] permiten concluir que el porcentaje de humedad recomendado para las partículas debe ser mayor de 10, estimado en el cual el porcentaje de germinación de las plantas aumenta significativamente.

En el caso de las virutas, se debe tener en cuenta sobre la elección de las mismas para ser adicionadas en el *compost* (dado que poseen una alta porosidad y un bajo porcentaje de humedad, aspectos muy importantes a la hora de mezclar con materiales de alto contenido de humedad) que se recomiende un porcentaje de humedad en un rango del 4 al 8%.^[111,112]

Control de pH

- **pH para aserrín.** Investigaciones realizadas por la Universidad Nacional de Colombia^[109] y el Colegio de Posgraduados (Montecillo, estado de México)^[106] permiten concluir que los valores de pH para el aserrín que sale de la cadena de procesos de la transformación de la madera, deben estar entre 5,5 y 8,0, ya que entre estos valores el problema de fungosis (aparición de hongos) puede mitigarse, y se evitan problemas en la germinación y en el crecimiento de la planta; de igual forma, este rango favorece el desarrollo y crecimiento óptimo de las raíces de las plantas, lo que aumenta la presencia de algunos nutrientes.^[106]
- **pH para virutas.** El rango de un pH para virutas de madera debe ser menor de 7, ya que al ser mezcladas con otros subproductos orgánicos, contribuyen al aumento de valores del pH en el sustrato orgánico; esto afecta directamente la actividad microbiológica y lleva a un porcentaje de germinación de entre el 60% y el 80%.^[113]
- **pH para astillas.** Las astillas de madera deben contener un nivel de pH recomendado de entre 5,5 y 7,0, ya que así pueden contribuir a la reducción del pH global del *compost*, lo que favorece la acción de los descomponedores bacterianos y fúngicos.^[101]

Tamaño de los residuos

- **Tamaño de partículas.** De acuerdo con estudios realizados por la Universidad Nacional de Colombia,^[109] la Universidad de Wisconsin-Madison^[101] y la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (Sagarpa) de México,^[95] se concluye que el tamaño de las partículas de madera (aserrín) debe estar entre 0,04 y 2,54 cm, ya que este tamaño permite que el intercambio de sustancias sea eficiente, haya mayor superficie de contacto y, por lo tanto, fermentaciones más rápidas y homogéneas; asimismo, los microorganismos tendrían más superficie que colonizar. Una mezcla de tamaños en este rango puede contribuir a crear propiedades complementarias en una pila más porosa.
- **Tamaño de virutas.** Las virutas poseen una geometría distinta a la del material particulado obtenido en los procesos de producción; por tanto, es importante que aquel sea distinto al de las partículas, ya que se

pretenden virutas tal cual se obtienen en forma de residuos, sin la intervención de procesos que las conviertan en material particulado; así, para las virutas, el tamaño recomendado debe ser menor de 5 cm, ya que con esta dimensión se ha presentado buena retención de humedad, factor dependiente de la granulometría y de su porosidad.^[114]

Conductividad eléctrica (CE). La conductividad eléctrica de los subproductos madereros como el aserrín y la corteza debe estar comprendida en un rango de 1,84 a 2,69 dS/m (dS = *decisiemens*), en cuyo caso se indica que son sustratos ricos en materia orgánica que ayudan a que las plantas crezcan satisfactoriamente.^[106]

Capacidad de intercambio catiónico (CIC). La capacidad de intercambio catiónico para los subproductos como corteza y aserrín debe estar entre 43,6 a 89,4 meq/100 g (miliequivalentes por 100 g). Debe tenerse en cuenta que la CIC aumenta cuando crece el pH y que ambos aumentan cuando crece el contenido de materia orgánica; adicionalmente, la CIC amortigua los efectos de pH y la salinidad.^[106,110]

4. *Pellets* de madera

Desde la prehistoria, la biomasa ha sido utilizada por el hombre en hogueras, hornos y calderas; incluso, llegó a ser el principal combustible utilizado hasta la Revolución Industrial para la calefacción en hogares, para producir metales y para alimentar máquinas de vapor.^[115] En la década de los 70, en respuesta a la crisis por los altos precios de los combustibles fósiles, comenzó la fabricación de los *pellets* a gran escala, principalmente en Bélgica, Países Bajos, Reino Unido y Suecia,^[116] que buscaron sustituir la leña sin tener que pagar el sobrecosto del combustible fósil, y así contribuyeron a la disminución del impacto ambiental significativo causado por el dióxido de carbono emitido por los combustibles convencionales. Los *pellets* se convirtieron en una opción de fuente de energía renovable alternativa.

Los *pellets* son un producto totalmente natural, tienen forma cilíndrica y se manufacturan en dimensiones variables, comúnmente diámetros entre 6 mm y 8 mm y longitudes comprendidas entre 5 mm y 25 mm.^[117] Se encuentran estandarizados bajo normas de calidad como la UNE-EN ISO 17225-2:2014 (“Biocombustibles sólidos. Especificaciones y clases de combustibles. Parte 2: Clases de *pellets* de madera”), que determina las clases de calidad de los combustibles y las especificaciones de los *pellets* de madera clasificados para uso no industrial e industrial, y elaborados a partir de biomasa leñosa procedente del monte, plantaciones o madera virgen, y de subproductos y residuos de la industria del procesamiento de la madera y de madera usada, no tratada químicamente.^[118] *Pellets* típicos se muestran en la **Figura 6-44**.



Figura 6-44. *Pellets* de madera.
Tomada y modificada de^[116]

La materia prima a partir de la cual se fabrican los *pellets* es diversa, aunque en el caso de maderas se recomienda que sea virgen y sin aditivos, o de residuos de la misma, incluyendo aserrín natural seco, ramas, restos de poda, paja, corteza de árboles, astillas, maderas de desecho, polvo de lijado y hierbas, madera de desechadas en la industria del aserrío por su diámetro

menor, residuos de las industrias del aserrío como virutas y recortes; incluso pueden fabricarse también a partir de materiales orgánicos como tallos de algodón, cisco de arroz, cáscaras de frutos secos, cascarilla de maíz y fertilizantes orgánicos.^[119,120] Esta amplitud de materiales empleados para su fabricación proporciona, principalmente, una variación en su color, característica que, a su vez, depende de la temperatura de secado de la materia prima y de la presión ejercida en su fabricación, aunque no determina la calidad. Sin embargo, los *pellets* de madera no deben ser más oscuros que una taza de café negro; un color excesivamente oscuro puede indicar que la corteza se mezcló en el proceso de fabricación y los gránulos tendrán probablemente alto contenido de cenizas. En la **Figura 6-45** se observan *pellets* de diferentes tonalidades de acuerdo con su materia prima de origen.



Figura 6-45. *Pellets* fabricados a partir de distintas materias primas.
Tomada y modificada de^[121]

Los *pellets* de madera son una forma condensada de energía de biomasa de tamaño uniforme; son más fáciles de almacenar y usar que muchos otros combustibles de biomasa. El proceso de conformación se basa en el principio de compresión de los residuos de la madera a alta presión para darles forma con un molde. Al final se obtiene un material denso, con bajo

contenido de humedad y gran dureza, y un contenido energético más alto en peso (aproximadamente 7.750 Btu por libra con un contenido de humedad promedio del 6%), lo que estimula su duración una vez introducidos en calderas.

Un proceso productivo típico para la fabricación de los *pellets* se muestra en la **Figura 6-46**; en esta se observa que la producción comienza con la recepción de materias primas en forma de chips de madera, a los que se les hace un proceso de pre-molienda para convertirlos en aserrín bajo condiciones de particulado específicas (etapas 1-2); conjuntamente, se puede realizar la recepción de materia prima en forma de aserrín (etapa 3), que en unión con el particulado obtenido en las etapas anteriores se somete a un proceso de secado (etapa 4); el proceso de pelletizado y conformado del *pellet* se realiza entre las etapas 6 y 9, donde se ejecutan labores de molido para obtener granos finos, el pelletizado y el enfriado; finalmente, el empaquetado del producto se lleva a cabo en la etapa 10, para así culminar la fabricación de los *pellets* de madera.

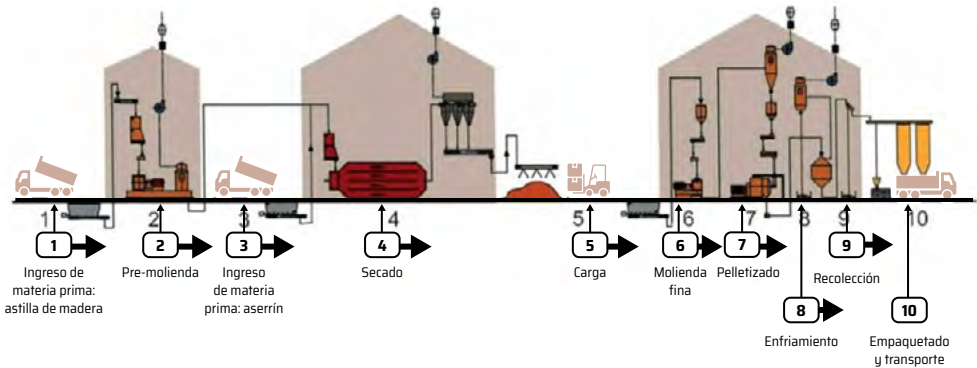


Figura 6-46. Flujo de proceso para elaboración de *pellets* de madera.
Tomada y modificada de^[122]

El objetivo principal de la pelletización es tomar un material de alimentación finamente dividido, a veces polvoriento, desagradable y difícil de manejar, y usando calor, humedad y presión formar partículas más grandes. Estas partículas son más fáciles de manejar, más aceptables y, por lo

general, reducen el impacto ambiental causado por la generación de residuos especiales, como en este caso el aserrín y el retal de madera, difíciles de degradar; esto contribuye, a la vez, a la explotación sostenible y a la reutilización de bosques.

Las ventajas principales de este tipo de biocombustibles se mencionan en la **Tabla 6-6**.

Tabla 6-6. Ventajas de la utilización de los *pellets*.

De uso	Ambientales
Mayor poder calorífico que la leña.	Energía limpia y no contaminante.
Fácil y rápido encendido.	Fuente renovable.
Baja humedad.	Fabricados con restos forestales, contribuyen a la limpieza del medio ambiente.
Alta densidad.	100% reciclados.
Ocupan menos espacio.	Naturales, no tóxicos.
Limpios.	Sin conservantes, químicos ni aditivos.
Homogéneos.	Sin malos olores.
Fácil manipulación.	CO ₂ neutro, lo que evita el efecto invernadero, cambio de clima y calentamiento global.
Sin olores, humos ni chispas.	No generan impacto ambiental.
Sin aglutinantes ni aditivos.	
Menor porcentaje de cenizas.	
100% ecológicos y naturales.	

Tomada y modificada de^[17]

Las principales aplicaciones de los *pellets* se encuentran en los combustibles para la generación de calor y electricidad, siendo el uso en calefacción residencial el más expandido debido a su facilidad y eficiencia; por otro lado, en el mercado industrial, el uso de los *pellets* está enfocado a la generación (generadores de llama directa, aire caliente para secadores, calentamiento de fluidos como aguas y aceites industriales) y a la cogeneración de energía (produciendo de manera simultánea energía térmica y eléctrica).

Otras aplicaciones incluyen el sector animal: sirven para camas de caballos y gatos, ya que son muy saludables para estos al no generar polvos y no tener aditivos químicos, además de ser muy absorbentes, limpios, biodegradables y no producir barro.^[120,123] Algunos de estos usos se muestran en la **Figura 6-47**.

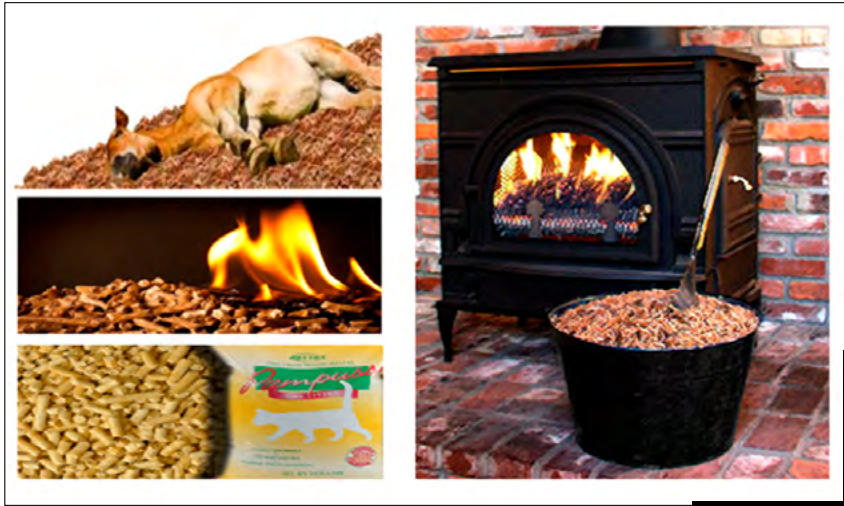


Figura 6-47. Usos típicos de *pellets* de madera.
Tomada y modificada de^[147]

Mientras que los *pellets* de madera típicamente no se diferencian entre las fuentes de maderas blandas o duras, hay tres grados basados en la cantidad de ceniza producida cuando se quemán:^[124] *premium* (contenido de cenizas < 1%), estándar (contenido de cenizas entre 1% y 2%) e industrial (contenido de cenizas de > 3%). Los *pellets* de calidad *premium* y estándar son adecuados para cualquier caldera de *pellets* de madera con eliminación automática de cenizas, incluyendo la mayoría de las aplicaciones de escala institucional o comercial. Los gránulos de grado industrial, o aquellos con contenido de ceniza superior al 3%, deben evitarse por el alto volumen de ceniza producida. No obstante, las dimensiones, la densidad y otros factores están especificados por grupos industriales. En la **Tabla 6-7** se describen los estándares de los *pellets* de acuerdo con su uso final.

Tabla 6-7. Estándares de los *pellets* dependiendo de su uso final.

Propiedad	Grado Premium	Grado estándar	Grado industrial
Densidad de bulto.	40-46	38-46	38-46
Diámetro (mm).	5,84-7,25	5,84-7,25	5,84-7,25
Largo (porcentaje > 1,5 in).	1,0	1,0	1,0
Índice de durabilidad.	96,5	95	95
Porcentaje de ceniza inorgánica.	1,0	2,0	6,0
Porcentaje de humedad.	6,0	10	10
Cloro (ppm).	300	300	300

Tomada y modificada de^[125]

Los costos de los *pellets* son relativamente bajos en comparación con el resto de las fuentes de energía; sin embargo, estos precios están sujetos a cambios y se ven afectados por el proceso de producción y por la calidad de los productos de madera utilizados. En la **Figura 6-48** se muestra una comparación entre los costos asociados a las diferentes fuentes combustibles utilizadas para calentamiento residencial: los *pellets* de madera son la fuente más económica entre las estudiadas.

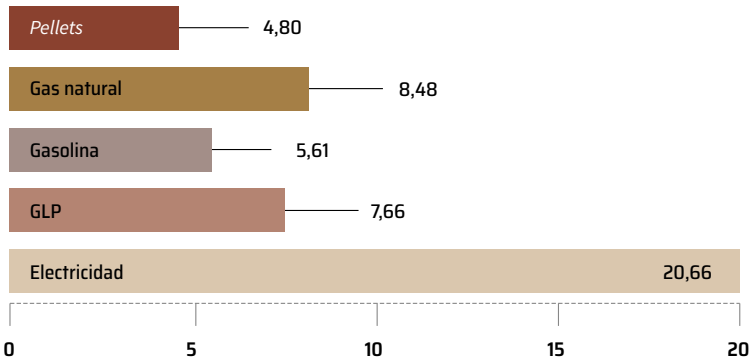


Figura 6-48. Costos de combustible para calentamiento residencial (centavos/kWh).

Tomada y modificada de^[122]

A pesar de que el uso de los *pellets* en el mercado colombiano está apenas en su etapa inicial, la tendencia que se muestra es de aumento. Esta fase inicial la respalda, por ejemplo, la Planta Villa Don Bosco, ubicada en Santander de Quilichao, norte del departamento del Cauca, en la que se elaboran briquetas que tienen un estimado de exportación de cinco años, contados desde el 2012, con destino a Suiza; este proyecto ha sido posible gracias a la alianza entre Smurfit Cartón de Colombia, Gases de Occidente y el Centro de Capacitación Don Bosco. El panorama colombiano corresponde a la tendencia de consumo y producción de *pellets* en Latinoamérica que se muestra en la **Figura 6-49** y en la **Figura 6-50**, respectivamente.

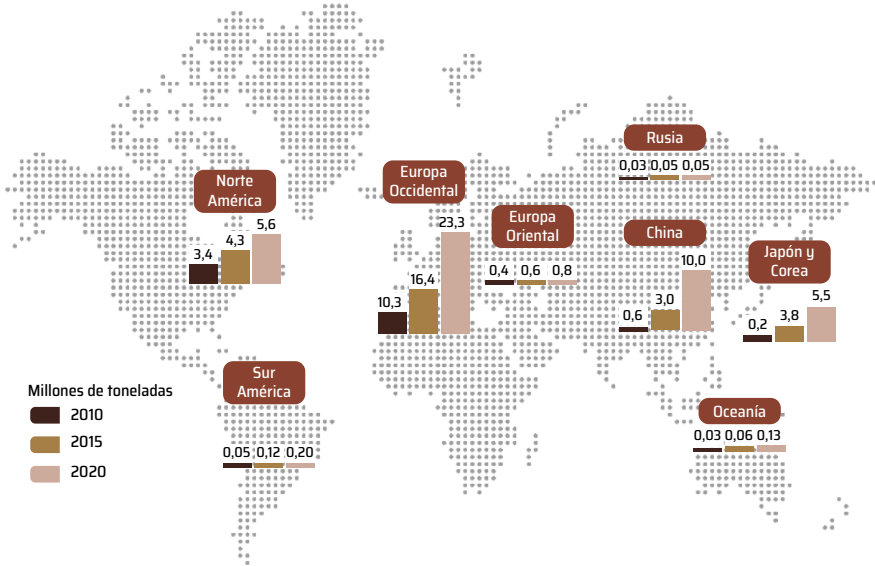


Figura 6-49. Proyección del consumo mundial de *pellets*.
Tomada y modificada de^[116]

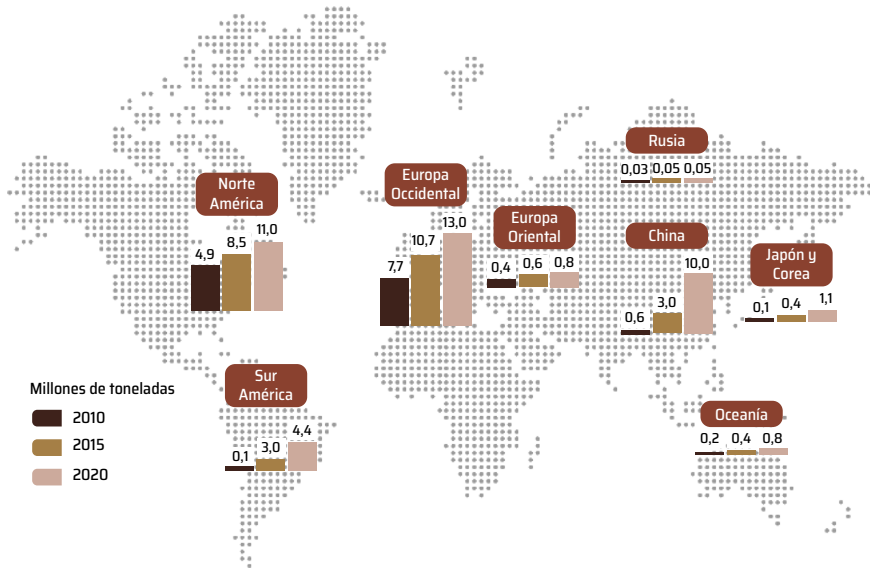


Figura 6-50. Proyección de la producción mundial de pellets.
Tomada y modificada de^[116]

Características identificadas de las especies maderables

El conocimiento de la composición química de la biomasa es de gran importancia para la evaluación de la utilizabilidad de la materia prima para la pelletización y el uso térmico. En este contexto, puede hacerse una distinción entre la estructura molecular de la biomasa, que es principalmente relevante para el tratamiento de la materia prima (por ejemplo, para la pelletización), y la estructura elemental, cuyo conocimiento es de especial valor para comprender el proceso de descomposición térmica.

Desde un punto de vista técnico, casi todas las biomásas son aptas para ser pelletizadas; sin embargo, el éxito de la pelletización solo se logra si la materia prima es relativamente constante en su distribución de tamaño de partícula/grano, contenido de agua y composición química.

Asimismo, deben eliminarse componentes ajenos a los residuos de la madera que se consideran extraños, tales como metales, plásticos y piedras, usualmente empleando técnicas de cribado, separación, tiraje manual, etc.^[115]

Contenido lignocelulósico. Las fracciones másicas de celulosa, hemicelulosa y lignina afectan el contenido de carbono de la materia prima y, por lo tanto, el contenido energético (poder calorífico), en base seca, de los *pellets*.

Un alto contenido de celulosa, que se traduce en un gran número de grupos hidrófilos, influirá en la absorción de agua y en la reducción de agua de la materia prima (características de secado). Por su parte, la estructura amorfa característica de la hemicelulosa promueve la absorción de agua de la materia prima, pero retarda la liberación de agua y, por lo tanto, el tiempo de secado.

La lignina inherente a la madera sirve como ligante para aglomerar el *pellet*; dicho contenido en la madera debe estar entre el 20% y el 30%. Se recomienda usar como materia prima las maderas con los niveles más altos de lignina, ya que conducirán a un *pellet* más duradero.^[115,126]

Contenido de humedad. Un contenido de agua demasiado alto del material fuente reduce las propiedades físicas/mecánicas de los gránulos y, especialmente, su resistencia (abrasión). Los *pellets* pueden quedar fisurados e hincharse debido al vapor ventilado inmediatamente después de salir de la prensa. Esta reducción en la calidad puede ocurrir también con un contenido de agua no homogéneo de la materia prima antes de la pelletización.

La humedad afecta directamente el contenido de energía entregado por el *pellet*, así como la capacidad de ignición y combustión del biocombustible; de tal forma que es importante tener en cuenta que al disminuir el contenido de humedad de la biomasa, aumenta su poder calorífico. Se recomienda que esta sea reducida a un intervalo comprendido entre el 8% y el 12%, pero no menor, ya que en este caso se podría presentar combustión espontánea.^[126,127]

Contenido de cenizas. Transformaciones químicas en los *pellets* en el proceso de combustión producen cenizas y el contenido de estas en la biomasa afecta la combustión, diseño y rendimiento de los sistemas de la misma combustión. Para obtener resultados satisfactorios se recomienda que el rango para el contenido de cenizas en la madera esté en un intervalo de 1% y 1,5%, donde el 1% son cenizas para ramas y el 1,5% leña, ramas, especies coníferas y frondosas.^[115,126]

Tamaño de partícula. El aserrín, después de la etapa de molienda, debe presentar tamaños comprendidos entre 0,7 mm y 6,5 mm; sin embargo, se recomienda usar los tamaños combinados, ya que las partículas más finas generan mayor resistencia y durabilidad en los *pellets*, mientras que las partículas más grandes sirven como rellenos, eliminando así espacios entre partículas.^[128]

Tamaño de viruta. Estudios realizados por Correa Méndez *et al.* permiten concluir que se obtienen *pellets* de buena calidad usando virutas de hasta 4 mm. Se recomienda no usar partículas que excedan este tamaño porque intervienen en la resistencia de los *pellets* y generan, por las fuerzas físicas como los puentes sólidos, las fuerzas de atracción entre las partículas sólidas, uniones de enclavamiento o entrelazamiento mecánico, fuerzas de adhesión y cohesión.^[129]

Densidad. De acuerdo con los estudios realizados por C. A. Román y A. T. Gil, los residuos de madera aptos para fabricación de *pellets* se presentan en forma de astillas, leñas y ramas, con densidades de 250 kg/m³ y 400 kg/m³, respectivamente.^[115] Referente al tipo de especies, argumentan un rango de densidad según sea conífera o frondosa, entre 350 y 700 kg/m³ para ambos tipos. Estos valores y rangos de densidades se concluyen como aptos para obtención de *pellets* de buena calidad.

pH. Lima Rojas sugiere que el rango de pH para las especies usadas en la fabricación de *pellets* se encuentre en el intervalo comprendido entre 5,18 y 6,01; en su estudio utilizó, en su mayoría, especies coníferas para el proceso de pelletizado.^[126]

Inclusión de corteza. La proporción relativamente alta de lignina en la corteza puede producir una mejora en la tasa de rendimiento de la prensa de *pellets*, incluso con bajas tasas de mezcla. Sin embargo, la mezcla de la fracción de corteza representa un criterio de calidad decisivo para el uso de *pellets* de madera, ya que la corteza tiene un contenido significativamente mayor de metales pesados y cenizas.

La distribución porcentual en la mezcla de materias primas es dependiente del tamaño granulométrico que opta la madera al someterse esta al proceso de molienda, ya sea en forma de viruta o aserrín. Respecto a estas dos formas de residuo y de acuerdo con los estudios realizados por Correa Méndez *et al.*, la inclusión de corteza tiene dos variaciones: la primera se refiere a si esta se mezcla con aserrín, caso en el cual se admite una inclusión de corteza de hasta 25,49%, y la segunda corresponde a la mezcla con virutas, en la que se admite un porcentaje mayor, de hasta 61,67%. En ambos casos, la inclusión de corteza ha entregado *pellets* de propiedades aceptables.^[129]

5. Carbones activados

El carbón activado es un material carbonoso amorfo que tiene una superficie y porosidad interna altamente desarrolladas y una concentración relativamente alta de grupos funcionales hidrofílicos en dicha superficie que le confieren la capacidad de adsorber productos químicos de gases y líquidos. La estructura porosa es quizás la propiedad física principal que caracteriza a los carbones activados: está formada por poros de diferentes tamaños que, según las recomendaciones de la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC), se pueden clasificar en tres grupos principales: macroporos, mesoporos y microporos. Los microporos son útiles para adsorber moléculas muy pequeñas presentes en purificaciones de gases; los mesoporos, por su magnitud de diámetro, son utilizados en purificaciones de líquidos; y los macroporos no contribuyen al área total de un carbón, pero actúan como vías de acceso a los poros intermedios, afectando así la velocidad de expansión de las impurezas en el carbón.^[130] En la **Figura 6-51** se puede apreciar la representación esquemática de la red de poros de un adsorbente de carbono.

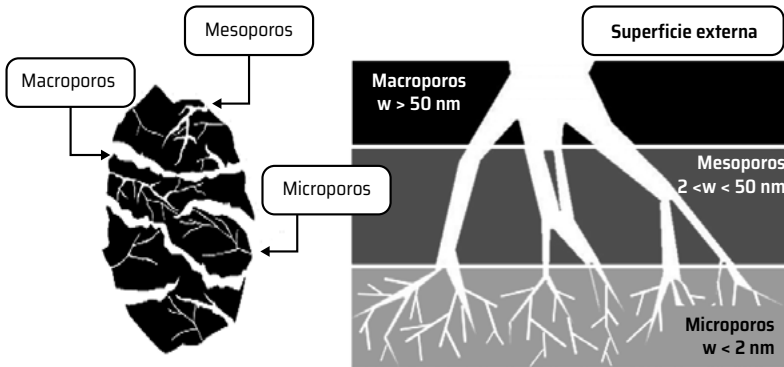


Figura 6-51. Tipos de poros en el carbón activado.
Tomada y modificada de^[130]

Los carbones activados se fabrican por pirólisis (o carbonización) de materiales carbonosos de origen vegetal, que no sean grafiticos ni grafitizables y tengan una estructura isotrópica inicial; luego viene una activación de los carbones obtenidos de ellos.^[130,131] La carbonización de cualquier material carbonoso en un atmósfera inerte y a una temperatura máxima de 800 °C implica la descomposición de moléculas orgánicas, evolución de productos alquitranados y gaseosos, volatilización de la materia orgánica (eliminación de especies que no producen carbono) y producción de una masa de carbono fija con una estructura de poro rudimentaria mediante la reorganización de los átomos de carbono.^[131]

Los carbones porosos obtenidos contienen predominantemente macroporos, ya que muchos grupos funcionales y cadenas puente se desarrollan, lo que da lugar a espacios vacíos.^[129] La estructura microporosa comienza a formarse aproximadamente a 500 °C, y a menudo no es accesible desde la superficie externa debido a que la red mesomacroporosa está bloqueada por la deposición de hollín (especialmente a altas temperaturas y a alta velocidad de calentamiento).^[130]

El flujo de procesos típico para la obtención del carbón activado se muestra en la **Figura 6-52**.

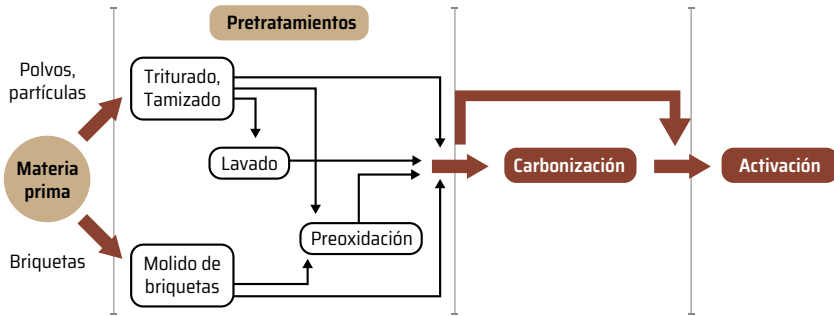


Figura 6-52. Flujo de proceso para la producción de carbón activado.
Tomada y modificada de^[130]

Un adsorbente con una porosidad altamente desarrollada y un área superficial correspondientemente grande se obtiene solamente activando el material carbonizado, ya sea por activación física o química. Durante el proceso de activación física, el material se carboniza y después se hace reaccionar con un gas oxidante, como aire, dióxido de carbono o vapor de agua a alta temperatura para desarrollar los poros. Este método típicamente produce carbones activados con estructura de poros finos, lo que es ideal para la adsorción de líquidos y compuestos en fase de vapor.^[132,133]

El proceso de activación química implica la impregnación de un agente químico, activadores y deshidratantes, tales como ácido fosfórico y cloruro de cinc, sobre el material antes del tratamiento térmico en una atmósfera inerte, lo que influye en la descomposición pirolítica, inhibiendo la formación de alquitrán y mejorando, de este modo, el rendimiento de carbono.^[133] Esta técnica tiende a producir carbón activado con estructura de poro grande, por lo que químicamente el carbón activado es más adecuado para adsorber grandes moléculas;^[130,132] sin embargo, aquel obtenido necesita limpieza por lavado.

A pesar de que los carbones activados son productos complejos, difíciles de clasificar con base en su comportamiento, características superficiales y métodos de preparación, una cierta clasificación se hace según sus características físicas. Usual y comercialmente, el carbón activado puede encontrarse en diferentes formas, tales como *pellets*, gránulos, cilindros, esferas

y polvo;^[130] dichas presentaciones se muestran en la **Figura 6-53**. Con esta variedad de formas se logra satisfacer las necesidades que surgen en los diferentes sectores productivos.



Figura 6-53. Tipos comerciales de carbón activado.
Tomada y modificada de^[134]

Los carbones activados son adsorbentes extremadamente versátiles y de importancia industrial; se utilizan en una amplia gama de aplicaciones, que se refieren principalmente a la eliminación de especies no deseadas por adsorción de líquidos o gases con el fin de efectuar la purificación o la recuperación de constituyentes químicos. También encuentran uso como catalizadores o soportes de catalizadores. La causa de la propiedad adsorbente es debida a la acción capilar en los numerosos microporos del carbón y a la gran superficie del carbón activado.^[135] Así, tienen gran demanda en el sector alimenticio, algunas empresas del sector químico, farmacéutico, textil y, en general, todas aquellas empresas que realicen un tratamiento a sus aguas, antes o después de sus procesos productivos, como se observa en la **Figura 6-54**.^[136]

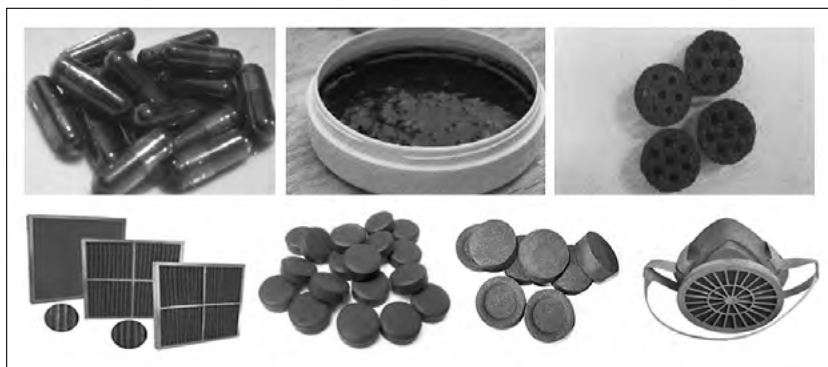


Figura 6-54. Aplicaciones típicas del carbón activado.
Tomada y modificada de^[147]

Como las aplicaciones del carbón activado son inmensas, la brecha entre la demanda y la oferta es cada vez mayor; esto puede resultar en escasez del material y en un incremento en su precio. Esta situación exige explorar nuevas fuentes de materiales de carbono con propiedades físico-químicas deseadas, es decir, que cuenten con una superficie específica alta, una porosidad micro, meso o ambas (dependiendo de la aplicación final), funcionalidad superficial, estabilidad térmica, pureza del carbono, capacidad de adsorción y composición química (presencia inherente o inducida de heteroátomos como B, N, S y P).^[133]

Los materiales lignocelulósicos tienen una promesa de suministro renovable e inagotable de carbono; están distribuidos de manera más uniforme en todo el mundo con respecto al carbón o al petróleo, y no son costosos. Así, el material lignocelulósico, un recurso natural regenerable, es una opción viable para la generación de materiales de carbono en lugar de los combustibles fósiles. En la práctica, las materias primas usadas como precursor de carbón activado incluyen madera, carbón, lignito, cáscara de coco, turba y otros, que por ser materiales baratos y con alto contenido de carbono y bajo contenido inorgánico, tienen la capacidad de producir un carbón poroso, con buenas características y gran demanda. Los desechos del sector forestal (aserrín, viruta) también pueden ofrecer una fuente renovable de carbón activado, como se observa en la **Figura 6-55**.



Figura 6-55. Conversión de subproducto maderero a carbón activado.
Tomada y modificada de^[137]

El aserrín presenta la capacidad de remover sustancias indeseadas del agua debido a la presencia de la lignina de su pared celular. Se considera que este es el material lignocelulósico más prometedor por su bajo costo, gran capacidad de adsorción y facilidad de adquisición, además de ser un desecho industrial al que se le puede dar valor agregado y que, a su vez, contribuiría a reducir el costo de tratamiento de este desecho sólido.^[138]

Una gran ventaja del carbón activado es que es un adsorbente de alta calidad, de diseño y funcionamiento simple. Puede ser considerado de bajo costo si requiere poco procesamiento y su precursor es abundante en la naturaleza; asimismo, es resistente a ambientes corrosivos (ácidos y básicos) y tóxicos. Por lo anterior, la demanda de carbón activado es creciente, motivada por la preocupación mundial sobre la contaminación, que ha llevado a los científicos de las últimas décadas a buscar alternativas para el tratamiento de efluentes contaminados con metales pesados, siendo la madera el principal precursor utilizado para su producción.^[139]

Investigaciones realizadas por la Universidad EAFIT señalan que alrededor del 90% del carbón activado es utilizado en Colombia es importado.^[136] De esta manera, se presenta como una oportunidad para el aprovechamiento de los recursos forestales en el país, los cuales, por cierto, han sido usados en forma desasociada, tienen poco o ningún valor económico y con frecuencia presentan problemas de eliminación. Existe, así, la necesidad de valorizar estos subproductos de bajo costo y proporcionar una alternativa potencialmente barata a los carbones activados comerciales existentes.

Características identificadas de las especies maderables

Para la selección de una materia prima adecuada en la preparación de carbón activado se tienen en cuenta varios factores. Se prefiere industrialmente un material barato con alto contenido en carbono y bajo contenido inorgánico (es decir, bajo contenido en agua y cenizas) como materia prima para la producción de carbón activado. La alta densidad del precursor y el suficiente contenido volátil son de considerable importancia. A continuación se analiza con más detalles:

Contenido lignocelulósico. La composición química de la madera debe ser considerada, puesto que tiene significativa influencia en el desarrollo de la porosidad del carbón activado. Principalmente, la lignina tiene la estructura más adecuada para el desarrollo de la porosidad, especialmente microporosidad; sin embargo, la influencia de los otros componentes de la biomasa (celulosa y hemicelulosa) en la formación de porosidad requiere una investigación más exhaustiva.

Estudios realizados por Zibetti *et al.*,^[140] Khezami *et al.*^[141] y la Universidad de Buenos Aires^[142] permiten concluir que el contenido de lignina en la madera debe encontrarse en el rango entre 18% y 35% peso, intervalo en el cual se aumenta el carbón fijo y se produce la disminución de las cenizas en el carbón activado.

Análisis próximo. El carbón activado se debe obtener a partir de materiales orgánicos con un elevado contenido de carbono y material volátil, pero bajo contenido de cenizas. Investigaciones realizadas por la Escuela Politécnica Nacional de Ecuador^[138] y la Universidad de Buenos Aires^[142] indican que el porcentaje de carbón fijo para los subproductos del sector maderero debe ser mayor que 7,95 peso, ya que se puede considerar que la cantidad de carbón activado resultante está en función de la cantidad de carbón fijo; es decir, a mayor porcentaje de carbón fijo en la muestra, mayor el rendimiento del carbón activado obtenido.

Generalmente, las maderas blandas y duras, que se caracterizan por un contenido de carbono fijo entre 40% y 45%, de volátiles entre 55% y 60% y de cenizas entre 0,3% y 1,1%, producen un carbón activado con textura

suave y volumen de poro grande, preferido para la adsorción en fase acuosa.^[131] Por su parte, el contenido de cenizas varía ampliamente con la materia prima utilizada en la fabricación hasta el 20%; para carbones activados hechos de madera el contenido de cenizas es de entre 3% y 8%.^[143]

Carbón fijo del subproducto llevado a carbón activado. Investigaciones realizadas por la Escuela Politécnica Nacional de Ecuador^[138] y la Universidad de Buenos Aires^[142] recomiendan que el porcentaje de carbón fijo para los subproductos del sector maderero que sean llevados a esta aplicación debe ser mayor que 7,95%, ya que se puede estipular que la cantidad de carbón activado resultante está en función de la cantidad de carbón fijo; es decir, a mayor porcentaje de carbón fijo en la muestra, mayor el rendimiento del carbón activado obtenido.

Contenido de humedad. Según investigaciones realizadas por las universidades Nacional de Colombia,^[139,144] EAFIT,^[136] Tecnológica Nacional de Argentina^[140] y Nacional de San Juan, Argentina,^[145] se concluye que el porcentaje de humedad debe estar entre 10% y 30%, evitando limitaciones del proceso en las condiciones de gasificación, para dar un rango positivo de carbón fijo aproximadamente del 30%.

Tamaño de partícula. Para entender la importancia e influencia del tamaño de partícula de los residuos de madera utilizados en la generación de carbones activados, debe tenerse claridad sobre un factor determinante en la calidad y eficiencia de adsorción: el índice de yodo, el cual muestra la porosidad del carbón activado y se define como los miligramos de yodo adsorbidos por gramo de carbono, representando el área superficial aportada por los poros mayores de 10 Å. Para que un carbón activado sea considerado comercial y de calidad aceptable, debe tener un índice de al menos 500 mg I₂/g.^[138,144]

De acuerdo con investigaciones realizadas por Asimbaya *et al.*, el tamaño de partícula del subproducto maderero debe estar entre 0,074 y 0,150 mm si se quiere obtener un alto índice de yodo en el carbón activado (con un valor mínimo de 740 mg l²/g), superior al comercial, y, a su vez, una mejor capacidad de adsorbente^[138] Adicionalmente, investigaciones realizadas por^[136,138-140,144,145] recomiendan producir carbones activados a partir de materiales con tamaños de partículas comprendidos entre 2 mm y 20 mm, para que alcancen un índice de yodo de 535 mg l²/g, que supera el valor mínimo comercial. Se concluye, entonces, que partículas de menor tamaño permiten obtener mayores valores del índice de yodo y, por ende, mayor capacidad de adsorción.

Densidad. Maderas con densidades altas requieren, para el proceso de activación, temperaturas altas y tiempo de residencia de activación mayor en comparación con maderas de densidades desde bajas a medianas, las cuales requieren menor temperatura.^[138] Los valores de densidad aparente dados en la literatura para los carbones activados utilizados en la adsorción de gases oscilan entre 0,40 y 0,50 g cm⁻³, mientras que para los carbones utilizados en la decoloración el intervalo está entre 0,25 y 0,75 g cm⁻³.^[143]

pH. Investigaciones realizadas por las universidades de Malasia,^[145] Nacional de San Juan^[145] y Tecnológica Nacional de Argentina^[140] afirman que el rango de pH de los materiales de origen maderero (aserrín, astillas, viruta) debe estar entre 6 y 7, ya que de este modo se aumenta la capacidad de adsorción entre 90% y 97,5%; en caso de ser menor o mayor que el rango establecido en la literatura, se deben adicionar sustancias ácidas o básicas para alcanzar estas condiciones.

Referencias bibliográficas

1. M. H. C. Martín, O. A. Molina, M. A. García y L. E. S. Rodríguez, “Tableros de madera de partículas”, Ing. 8, vol. 3, pp. 39-46, 2004.
2. J. C. F. Walker, “Primary wood processing. Principles and practice”, segunda edición, Netherlands: Springer, 2006.
3. L. Zambrano, P. Moreno, F. Muñoz y J. Durán, “Tableros de partículas fabricados con residuos industriales de madera de *Pinus patula*. Particle boards manufactured from industrial residues of *Pinus patula* wood”, Madera y bosques, vol. 19, n.º 3, pp. 65-80, 2013.
4. J. A. Youngquist, “Wood-base composites and panel Products” Wood handbook, Wood as an engineering material, General Technical Report (GTR, p. 10.1-10.31), 1999.
5. N. M. Stark, Z. Cai y C. Carll, “Wood-Based composite materials panel products, glued-laminated timber, structural materials”, Wood Handbook, Wood as an engineering material, pp. 252-280, 2010.
6. M. M. Refort, “Clasificación de tableros a base de madera”, Universidad Nacional de La Plata, pp. 1-51, 2015.
7. P. Demers y K. Teschke, “Industria de la madera”, Enciclopedia de la Salud y Seguridad en el Trabajo, p. 14, 2008.
8. A. Schejtman, “Composites de madera”, Universidad de Alcalá, pp. 1-8, 2008.
9. R. Rowell, “Handbook of wood chemistry and wood composites”, Estados Unidos: Taylor & Francis Group, 2005.
10. Pizano S. A., “Madecraft y Madecraft RH”.
11. H. R. Cea Muñoz, “Caracterización de astillas y aserrín para una planta de tableros de partículas en Valdivia”, Universidad Austral de Chile, Chile, 2003.
12. M. Fuentes-Salinas, F. Correa-Méndez, A. Borja-de la Rosa y A. Corona-Ambriz, “Características tecnológicas de 16 maderas del estado de Tamaulipas, que influyen en la fabricación de tableros de partículas y de fibras”, Rev. Chapingo Ser. Ciencias For. y del Ambient., vol. 14, n.º 1, pp. 65-71, 2008.
13. H. Poblete y R. Vargas, “Relación entre densidad y propiedades de tableros HDF producidos por un proceso seco”, Maderas. Cienc. y Tecnol., vol. 8, n.º 3, pp. 169-182, 2006.
14. H. Poblete y J. Sánchez, “Tableros con corteza de *Pinus radiata*”, Bosque, vol. 12, pp. 17-26, 1991.

15. A. Berterreche, H. Poblete, and P. Niemz, “Propiedades de tableros de partículas de *Pinus radiata* D. Don con aserrín de la misma especie”, *Cienc. e Investig. For.*, vol. 9, pp. 73-90, 1995.
16. M. Bellido, G. Egoavil y E. González, “Tableros de fibras de la madera de tornillo (*Cedrelinga cateniformis Ducke*)”, *Bosque*, vol. 24, n.º 3, pp. 39-44, 2003.
17. Hermanos Guillén, “Tableros de fibras”, 2016.
18. H. Thoemen, M. Irle y M. Sernek, “Wood based panels: an Introduction for specialists”, Inglaterra: Brunel University Press, 2010.
19. G. Keil y E. Spavento, “Industria de tableros de fibras de madera”, *Ind. For.*, vol. 1, pp. 1-24, 2009.
20. A. Rolleri y E. Roffael, “Rugosidad de tableros de fibra de densidad media (MDF) usando método de contacto y no contacto”, *Bosque*, vol. 27, n.º 1, pp. 72-77, 2006.
21. I. M. Jaimes-Cristancho, “El OSB: Un aglomerado con muchos usos y pocos adeptos por desconocimiento”, *Rev. M&M El Mueble y la Madera*, vol. 52, pp. 121-128, 2006.
22. European Panel Federation (EPF), “OSB”, Información técnica OSB (Oriented strand board). [En línea]. Disponible: <http://www.osb-info.org/Tecnica.html>. [Accedido: 20-Sep-2016].
23. Masisa S. A., “Tablero astilla OSB”, 2016.
24. Norbord, “Oriented Strand Board (OSB) Training Module”, 2016.
25. G. Gómez Ruiz y J. García Navarro, “Revisión sobre el ‘estado del arte’ del análisis de ciclo de vida para tableros derivados de la madera”, *CIMAD 11-1o Congresso Ibero-LatinoAmericano da Madeira na Construção*, p. 10, 2011.
26. F. Pichelin, A. Pizzi, A. Frühwald y P. Triboulot, “Exterior OSB preparation technology at high moisture content. Part 2 : transfer mechanisms and pressing parameters”, *Holz als Roh-und Werkst.* 60, vol. 60, pp. 9-17, 2002.
27. P. H. Espinoza-Pineda y J. M. Campos Salazar, “Estudio de optimización del control de la etapa de encolado del proceso de fabricación de los productos OSB de la empresa Louisiana Pacific Chile S. A.”, Universidad Austral de Chile, 2006.
28. A. O. Barry y D. Corneau, “Volatile organic chemicals emissions from OSB as a function of processing parameters”, *Holzforsch. Mag.*, vol. 53, pp. 441-446, 1999.
29. O. Prieto González, M. C. Touza y G. Pereiro, “Caracterización de algunas propiedades en tableros de corteza de *Pinus pinaster* Ait. y tableros de vermiculita expandida”, *Inf. La Construcción*, vol. 64, pp. 243-251, 2012.

30. C. M. Flores Martínez, “Elaboración de tableros OSB con residuos de la industria del laminado y dos tipos de adhesivos”, Universidad Nacional Agraria La Molina, 2006.
31. P. E. Arcos Sánchez y J. E. Allen Morello, “Fabricación de OSB y contrachapado a partir de *Eucalyptus nitens*: análisis del comportamiento en proceso”, Universidad de Bío-Bío, 2005.
32. J. R. Merchán Rodríguez, “Comportamiento estructural de vigas ensambladas con elementos de madera”, Universidad Nacional de Colombia, 2012.
33. C. E. Chacón Zúñiga, “Análisis comparativo entre el revestimiento del sistema EIFS con revestimiento de tableros OSB”, Universidad Austral de Chile, 2010.
34. I. M. Jaimes Cristancho, “El OSB: un aglomerado con muchos usos y pocos adeptos por desconocimiento”, Rev. M&M, pp. 121-128.
35. Reciclad@s Lucena, “Cómo hacemos llegar y preparamos nuestro producto”.
36. J. J. García Garrido, “La madera y materiales derivados en la fabricación de soportes artísticos: aportación estructural y estética”, Universidad Complutense de Madrid, 2003.
37. C. A. Londoño Echeverri y S. E. Sepúlveda Tabares, “Los tableros alistonados: una alternativa para el sector del mueble y la madera en Pereira y Dosquebradas”, Sci. Tech. Año 18, vol. 18, n.º 4, pp. 712-717, 2013.
38. Asociación de Investigación de las Industrias de la Madera (AITIM), “Tableros alistonados, tableros de madera maciza”, España.
39. S. Vignote Peña, “Productos derivados de la madera”, Productos derivados de la madera, Madrid, p. 56, 2014.
40. M. P. Ansell, “Wood composites”, Cambridge: Elsevier, 2015.
41. Gabarró Hermanos S. A., “Tablero alistonado en madera maciza natural”, España, p. 2.
42. R. Hernández, R. Coman y R. Beauregard, “Influence of machining parameters on the tensile strength of finger-jointed sugar maple lumber”, Wood Fiber Sci., vol. 43, n.º 1, pp. 2-10, 2011.
43. W. Frank, A. Ruiz-Díaz, M. E. Cayré y E. Sanabria, “Fabricación de tableros alistonados de aspidosperma quebrachoblanco con resinas Pvc”, 2005.
44. L. E. Arias Maya y L. Vanegas Useche, “Materiales compuestos inteligentes”, Sci. Tech., año 10, n.º 25, pp. 143-148, 2004.
45. “Advanced materials by design”, U. S. Congress Office Technology Assessment, n.º junio, p. 332, 1988.
46. F. Stupenengo, “Capítulo 10: materiales compuestos”, Materiales y materias primas, Buenos Aires, 2011.

47. B. Bensaude Vicent y T. Palucka, "The Dibner Institute for the history of the science and technology", Composites Overview, 2002. [En línea]. Disponible: https://authors.library.caltech.edu/5456/1/hrst.mit.edu/hrs/materials/public/composites/Composites_Overview.htm.
48. L. Millán, C. Agurto, J. Martín, *et al.* "Evaluación de la dureza en materiales compuestos SiC-Aleaciones base cobre, obtenidos por infiltración reactiva", CONAMET-SAM, pp. 11-17, 2003.
49. S. A. Tualombo Perdomo, "Desarrollo de un material compuesto apartir de fibras naturales para la utilización en viviendas", Universidad de las Fuerzas Armadas, 2015.
50. J. L. Soto Trinidad y J. M. Pimentel Medina, "Aplicación de compuestos de matriz cerámica reforzados con residuos", Twelfth LACCEI Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology (LACCEI'2014), p. 6, 2014.
51. I. F. Anderson, "Concrete-chip Hormigón de viruta y aserrín", 2014.
52. D. Alfano, "Spectroscopic properties of carbon fibre reinforced silicon carbide composites for aerospace applications", Properties and applications of Silicon Carbide, Rosario Gerhard, Ed. InTech, pp. 231-250, 2011.
53. K. E. Handrick, "Ceramic matrix composites (CMC) for demanding aerospace and terrestrial applications", XXI Congress AIV, n.º CMC, p. 46, 2013.
54. W. Valenzuela y T. Cruz, "Aptitud de la madera de cinco especies forestales para fabricar tableros de fibro cemento", Rev. For. del Perú, vol. 11, n.º 10, pp. 1-17, 2004.
55. D. D. Stokke, Q. Wu y G. Han, "Introduction to wood and natural fiber composites", first editi. John Wiley & Sons, Ltd., 2014.
56. Viroc Investwood, "Viroc® Cement Bonded Particle Board", 2013.
57. Cetriz, "Cetriz basic technical data sheet (TDS)". [En línea]. Disponible: <http://www.cetriz.cz/pagedata/boards/technical-data-sheet-basic-en.pdf?1467610461>. [Accedido: 11-Nov-2016].
58. "Wood Wool Cement Board", Krivaja Homes.
59. A. Saunders y E. Davidson, "Cement Boards 101", Global Cement Magazine, n.º enero, pp. 32-39, 2014.
60. B. Na, Z. Wang, H. Wang, and X. Lu, "Wood-cement compatibility review", Wood Res., vol. 59, n.º 5, pp. 813-826, 2014.
61. C. Soares Del Menezzi, V. Gomes de Castro y M. Rabelo de Souza, "Production and properties of a medium density wood-cement boards produced with oriented strands and silica fume", Maderas, vol. 9, n.º 2, pp. 105-115, 2007.

62. M. S. Mahzabin, R. Hamid y W. H. W. Badaruzzaman, "Evaluation of chemicals incorporated wood fibre cement matrix properties", *J. Eng. Sci. Technol.*, vol. 8, n.º 4, pp. 385-398, 2013.
63. S. Frybort, R. Mauritz y A. Teischinger, "Cement bonded composites a mechanical review", *BioResources*, vol. 3, n.º 2, pp. 602-626, 2008.
64. Y. Mi. Wei, Y. G. Zhou y B. Tomita, "Hydration behavior of wood cement-based composite I: evaluation of wood species effects on compatibility and strength with ordinary portland cement", *J. Wood Sci.*, vol. 46, n.º 4, pp. 296-302, 2000.
65. G. Vaickelionis and R. Vaickelioniene, "Cement hydration in the presence of wood extractives and pozzolan mineral additives", *Ceram. Silikaty*, vol. 50, n.º 2, pp. 115-122, 2006.
66. M. Defo, A. Cloutier y B. Riedl, "Wood-cement compatibility of some eastern canadian woods by isothermal calorimetry", *For. Prod. J.*, vol. 54, n.º 10, pp. 49-56, 2004.
67. R. Espinoza Herrera y A. Cloutier, "Compatibility of four eastern Canadian woods with gypsum and gypsum-cement binders by isothermal calorimetry", *Maderas. Cienc. y Tecnol.*, vol. 10, n.º 3, pp. 275-288, 2008.
68. M. Hachmi y A. A. Moslemi, "Effect of wood ph and buffering capacity on wood-Cement compatibility", *Holzforschung*, vol. 44, n.º 6, pp. 425-430, 1990.
69. S. Karade and L. K. Aggarwal, "Cement - bonded lignocellulosic composites for building applications", *Met. Mater. Process.*, vol. 17, n.º 2, pp. 129-140, 2005.
70. S. Vignote y I. Martínez, "Características de los tableros de madera", *Tecnología de la madera*, tercera edición, pp. 275-291.
71. Asociación de Investigación Técnica de Industrias de la Madera (AITIM), "Tableros de partículas aglomeradas con cemento", 2015. [En línea]. Disponible: https://www.csaec.com/area_tecnica/aitim/enlaces/documentos/Tableros_madera_cemento_15.06.2015.pdf.
72. R. Bouza Padín, "Diseño y caracterización de nuevos materiales compuestos polipropileno y madera: estudio del viniltrimetoxisilano como agente de acoplamiento", Universidad de la Coruña, 2008.
73. A. Gaitán, G. Fonthal y H. Ariza Calderón, "Fabricación y propiedades físicas de aglomerados de *Pennisetum purpureum schum*, *Philodendron longirrhizum* y *Musa acuminata*", *Ciencias Técnicas Agropecu.*, vol. 25, n.º 1, pp. 5-11, 2016.
74. M. A. Hidalgo y J. H. Mina, "Desarrollo y caracterización físico-química y mecánica de un material compuesto de matriz LDPE/PP reforzada con polvo de madera", *Revista Colombiana de Materiales*, vol. n.º 5, pp. 193-200, 2014.

75. A. A. Relaño Pastor, “Estudio comparativo de piezas de ABS y PLA procesadas mediante modelado por deposición fundida”, Universidad Carlos III de Madrid, 2013.
76. J. Silva González, “Impresión 3D: incursamiento en la industria de la madera”, *Rev. M&M*, pp. 84-89, 1978.
77. M. Olivares Santiago, C. Galán Marín and J. Roa Fernández, “Los composites: características y aplicaciones en la edificación”, *Informes la Construcción*, vol. 54, 2003.
78. D. D. Vicuña Vicuña, “Obtención de biocompuestos a partir de residuos de madera (*sawdust*) y resina termoplástica”, Universidad Politécnica Salesiana- Sede Cuenca, 2016.
79. M. Slijivic, N. Grujovic, A. Pavlovic, C. Fragassa, J. Illic y M. Topic, “Developing profiles from wood-plastic composites”, XII International Conference on Accomplishments in Electrical and Mechanical Engineering and Information Technology, 2015.
80. B. Holden, “American woodworker”, 10 things you need to know about plastic lumber, 2014. [En línea]. Disponible: <https://www.popularwoodworking.com/projects/aw-extras-41714-10-things-you-need-to-know-about-plastic-lumber>.
81. “G&B Import Latinoamérica C. A.”, *Proceso productivo WPC*. [En línea]. Disponible: <https://ecoinnovacion.jimdo.com/wpc/proceso-productivo/>.
82. D. J. Gardner y D. Murdock, “Extrusion of wood plastic composites”, *Adv. Eng. Wood Compos. Cent.*, pp. 1-6, 2002.
83. P. Moreno, D. Rodríguez, Y. Giroux, A. Ballerini y W. Gacitúa, “Caracterización mecánica y morfológica de termoplásticos reciclados espumados reforzados con subproductos de madera”, *Maderas. Cienc. y Tecnol.*, vol. 15, n.º 1, pp. 3-16, 2013.
84. S. Manohar Yadav y K. Bin Yusoh, “Mechanical and physical properties of wood-plastic composites made of polypropylene, wood flour and nanoclay”, *Proceeding- Kuala International Agriculture, Forestry and Plantation*, pp. 1-10, 2015.
85. A. Taylor, V. Yadama, K. Englund y D. Harper, “PB1779 wood plastic composites- a primer”, The University of Tennessee Agricultural Extension Service, 2009.
86. M. Solís Jara y J. Lisperguer Muñoz, “Compuestos mixtos a base de plásticos y madera”, *Theoria*, vol. 11, pp. 35-40, 2002.
87. M. J. Berger y N. M. Stark, “Investigations of species effects in an injection-molding-grade, wood-filled polypropylene”, in *Fourth International Conference on Woodfiber-Plastic Composites*, pp. 19-25, 1997.
88. A. A. Klyosoc, “Wood plastic composite”, John Wiley & Sons, Inc., 2007.

89. M. J. Schwarzkopf y M. D. Burnard, “Wood-plastic composites-Performance and environmental Impacts”, *Environmental Impacts of Traditional and Innovative Forest-based Bioproducts*, Environmen., A. Kutnar and S. Muthu (editores), Springer Science & Business Media B. V., pp. 19-44, 2016.
90. W. Gacitua y M. Wolcott, “Morphology of wood species affecting wood-thermoplastic interaction: microstructure and mechanical adhesion”, *Maderas-Ciencia y Tecnol.*, vol. 11, n.º 3, pp. 217-231, 2009.
91. A. Ashori, “Wood-plastic composites as promising green-composites for automotive industries”, *Bioresour. Technol.*, vol. 99, n.º 11, pp. 4661-4667, 2008.
92. S. Migneault, A. Koubaa, F. Erchiqui, *et al.* “Effects of processing method and fiber size on the structure and properties of wood-plastic composites”, *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 40, n.º 1, pp. 80-85, 2009.
93. D. Villamar, S. Galeas y V. Guerrero, “Materiales compuestos lignocelulósicos obtenidos mediante extrusión”, *Rev. Politécnica*, vol. 32, n.º 1, pp. 20-26, 2013.
94. J. Solís y M. Lisperguer, “Resistencia al impacto y a la tracción de materiales compuestos plástico-madera”, *Inf. Tecnológica*, vol. 16, pp. 21-25, 2005.
95. Secretaría de Agricultura Ganadería Desarrollo Rural y Pesca y Alimentación (Sagarpa), “Elaboración de composta”, *Subsecr. Desarro. Rural*, p. 8, 2010.
96. M. Delfino, M. del C. Sarno y M. Báez, “Tanino en *compost* a base de corteza de pino”, *Comun. Científicas y tecnológicas 2000*, pp. 1-2, 2000.
97. L. Montes, “Vía orgánica”, ¿Cómo hacer composta? [En línea]. Disponible: <http://viaorganica.org/composta/>.
98. M. A. Rodríguez Salinas y A. Córdova y Vázquez, “Manual de compostaje municipal-Tratamiento de residuos sólidos urbanos”, primera edición, México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología, Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ), 2006.
99. R. Haug, “The practical handbook of compost engineering”, Estados Unidos: Lewis Publishers, 1993.
100. R. Mills y C. Pearson, “Recycling in utah: green waste for compost”, Utah State University, pp. 1-5, 2015.
101. L. Cooperband, “The art and science of composting a resource for farmers and compost producers”, University of Wisconsin-Madison, Center for Integrated Agricultural Systems. pp. 1-14, 2002.
102. A. Garg y I. E. Tothill, “A review of solid waste composting process-The UK Perspective”, *Dyn. Soil, Dyn. Plant*, vol. 3, n.º 1, pp. 57-63, 2009.

- 103.** V. McMahon, A. Garg, D. Aldred, G. Hobbs, R. Smith e I. E. Tothill, “Evaluation of the potential of applying composting/bioremediation techniques to wastes generated within the construction industry”, *Waste Manag.*, vol. 29, n.º 1, pp. 186-196, 2009.
- 104.** Casella Organics, “Composting. Nature’s recycling”. [En línea]. Disponible: <https://www.casella.com/services/composting>. [Accedido: 12-Nov-2016].
- 105.** S. Hang, G. Castán, A. Negro, *et al.* “Compostaje de estiércol de *feedlot* con aserrín/viruta: características del proceso y del producto final”, *Agriscientia*, vol. 32, n.º 1, pp. 55-65, 2015.
- 106.** T. Córdova, A. Aldrete, V. M. Cetina y J. López, “Caracterización de medios de crecimiento compuestos por corteza de pino y aserrín”, *Madera Bosques*, vol. 14, n.º 2, pp. 41-49, 2008.
- 107.** L. Chen, M. D. H. Marti, A. Moore y C. Falen, “The composting process”, University of Idaho Extension, p. 5, 2011.
- 108.** O. Blumenstein, I. Schneider y L. Rensburg, “Wood compost process engineering, properties and its impacts on extreme soil characteristics”, 2011.
- 109.** J. A. Luna Fontalvo, L. S. Córdoba López, K. I. Gil Pertuz y I. M. Romero Borja, “Efecto de residuos agroforestales parcialmente biodegradados por *Pleurotus ostreatus* (*Pleurotaceae*) sobre el desarrollo de plántulas de tomate”, *Acta Biológica Colomb.*, vol. 18, n.º 2, pp. 365-374, 2013.
- 110.** A. L. Díaz, L. M. Morales Palencia y J. S. Beltrán Acosta, “Biological inoculant for promoting the growth of forest species and method for producing same”, US20160066583, 2016.
- 111.** A. Gallardo, M. D. Bovea, R. Contreras, *et al.* “Producción de *compost* a partir de viruta de madera y lodos estabilizados procedentes de una estación depuradora de aguas residuales urbanas. Influencia de la temperatura en el proceso de compostaje”, XI Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos, pp. 1929-1940, 2007.
- 112.** F. Ingelmo, M. J. Molina, S. M. D., A. Gallardo y L. Lapeña, “Efecto del tiempo de compostaje en la biodisponibilidad de metales pesados en un *compost* elaborado con lodos de depuradora y virutas de madera”, I Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos, p. 11, 2008.
- 113.** G. García-Castro y M. C. Daza-Torres, “Evaluación de enmiendas en el proceso de compostaje de residuos de curtiembres”, *Rev. Prod. + Limpia*, vol. 11, n.º 1, pp. 53-59, 2016. [En línea].
- 114.** L. Mora, “Sustratos para cultivo sin suelo o hidroponía”, XI Congreso Nacional Agronómico, III Congreso Nacional de Suelos, pp. 95-100, 1999.

115. C. Amengual Romani y Á. Triguero Gil, “Implantación central de biomasa forestal y aprovechamiento de las masas forestales”, 2013.
116. J. L. Ordóñez Jiménez, “Pellets: energía limpia con buen futuro”, Revista El Mueble y la Madera, vol. 83, 2010.
117. Atmos, “Calderas de pellets”. [En línea]. Disponible: <https://www.atmos.eu/spanish/kotle-004>. [Accedido: 11-Nov-2016].
118. A. Asociación Española de Normalización y Certificación, “Biocombustibles sólidos especificaciones y clases de combustibles. Parte 2: Clases de pélets de madera”. España, p. 14, 2014.
119. S. Döring, “Biomass types for pellet production” power from pellets, technology and applications, Berlín: Springer Science & Business Media B. V., pp. 13-30., 2013.
120. N. A. Fredes Núñez, “Evaluación técnica y económica de una planta de producción de combustible sólido a partir de biomasa forestal en la región de los lagos”, Universidad de Chile, 2014.
121. Fote Machinery, “Wood shavings pellet mill”.
122. Ohalloran Supplies, “Ohalloran supplies”, The advantages y uses of wood pellets, 2016. [En línea]. Disponible: <http://warmfuels.co.uk/faq/the-advantages-uses-of-wood-pellets>.
123. Compañía J. Nardelli, “Bioenergía ¿Qué es el *pellet*?”. [En línea]. Disponible: <http://www.jnardellimaderas.com.ar/bioenergia.php>.
124. Biomass Energy Resource Center, “Wood pellet heating”, Wood Pellet Heating, p. 26, 2007.
125. J. A. Roos y A. M. Brackley, “The asian wood pellet markets”. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station, Portland, OR. US, p. 25, 2012.
126. L. Lima Rojas, “Evaluación de la composición química y propiedades físicas de la madera y corteza de cuatro coníferas para la producción de bioenergía”, Universidad Autónoma de Nuevo León, 2012.
127. Asociación Adeco Bureba, “Fabricación de *pellets*: plan de desarrollo sostenibles Gal Adeco Bureba”, p. 23, 2012.
128. T. O. Wilson, “Factors affecting wood pellet durability”, The Pennsylvania State University, 2010.
129. F. Correa-Méndez, A. Carrillo-parra, J. G. Rutiaga-quiñones y E. Jurado, “Distribución granulométrica en subproductos de aserrío para su posible uso en pellets y briquetas. Granulometric distribution in timber byproducts for potential use in pellets and briquettes”, Rev. Mex. Ciencias For., vol. 5, n.º 25, pp. 52-63, 2014.

- 130.** J. A. Menéndez-Díaz y I. Martín-Gullón, “Types of carbon adsorbents and their production”, *Activated carbon surfaces in environmental remediation*, vol. 7, Elsevier B. V., pp. 1-48, 2006.
- 131.** S. M. Manocha, “Porous carbons”, *Sadhana*, vol. 28, n.º 1-2, pp. 335-348, 2003.
- 132.** M. A. F. Mazlan, Y. Uemura, S. Yusup, *et al.* “Activated carbon from rubber wood sawdust by carbon dioxide activation”, *Procedia Eng.*, vol. 148, pp. 530-537, 2016.
- 133.** B. Viswanathan, P. Neel y T. Varadarajan, “Methods of activation and specific applications of carbon materials”, *National Centre for Catalysis Research (NCCR)*, Chennai, India, p. 160, 2009.
- 134.** V. da S. Lacerda, “Aprovechamiento de residuos lignocelulósicos para la producción de biocombustibles y bioproductos”, *Universidad de Valladolid*, 2015.
- 135.** R. Rivera Hernández, N. Lara Luevano, C. I. Zertuche Silva, *et al.* “Obtención del carbón activado a partir de residuos de madera de la industria mueblera del estado de Aguascalientes”, *Concienc. Tecnológica*, vol. 23, p. 9, 2003.
- 136.** J. Mejía y J. Rendón, “Estudio de factibilidad para la creación de una empresa productora de carbón activado a partir de residuos de Pino pátula”, *Cuadernos de Investigación: Proyectos de Investigación 2006 Artículos*, Medellín: Universidad EAFIT, pp. 40-51, 2006.
- 137.** “Purair carbon filter company”, *Activated carbon-Shell, wood and coal based activated carbon*. [En línea]. Disponible: <http://www.carbon-filter.com/filterelements/activated-carbon.html>.
- 138.** C. Asimbaya, N. Rosas, D. Endara y V. H. Guerrero, “Obtención de carbón activado a partir de residuos lignocelulósicos de canelo. Laurel y Eucalipto”, *Rev. Politécnica*, vol. 36, n.º 3, 2015.
- 139.** J. F. Herrera Builes, W. Morales Yepes y J. Pérez Schile, “Selección de un método para producir carbón activado utilizando cuatro especies forestales”, *Rev. Fac. Nac. Agron.*, vol. 57, n.º 2, 2004.
- 140.** G. Zibetti, R. Benítez y E. Calandri, “Elaboración de carbón activado: contenidos celulares vs. carbón fijado en tres especies de interés forestal de la Provincia de Formosa”, *II Jornadas Investig. en Ing. del NEA y Países Limitrofes*, 2000.
- 141.** L. Khezami, A. Chetouani, B. Taouk y R. Capart, “Production and characterisation of activated carbon from wood components in powder: cellulose, lignin, xylan”, *Powder Technol.*, vol. 157, n.º 1-3, pp. 48-56, 2005.

142. M. R. Kim, E. L. Buonomo, A. L. Cukierman, P. R. Bonelli y D. Industrias, “Obtención de biocombustibles y carbón activado a partir de un precursor renovable”, vol. 11, pp. 27-32, 2007.
143. J. Pastor-Villegas, J. F. Pastor-Valle, *et al.* “Study of commercial wood charcoals for the preparation of carbon adsorbents”, *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 76, n.º 1-2, pp. 103-108, 2006.
144. J. F. Herrera-Builes, “El carbón activado como un producto secundario del bosque”, Universidad Nacional de Colombia, 2004.
145. F. Sardella, C. Deiana y H. Silva, “Carbones activados regionales en la adsorción de trihalometanos”, *Rev. Colomb. Química*, vol. 30, n.º 2, pp. 109-119, 2001.
146. A. Ahmad, M. Rafatullah, O. Sulaiman, *et al.* “Removal of Cu (II) and Pb (II) ions from aqueous solutions by adsorption on sawdust of Meranti wood”, *Desalination*, vol. 247, n.º 1-3, pp. 6
147. Pinterest. Recuperado de <https://co.pinterest.com/>

Metodología y experimentación

Con el fin de lograr el objetivo propuesto de “caracterizar los residuos de biomasa generados en la cadena productiva del sector madera para su aprovechamiento”, se presenta en este capítulo la descripción de la metodología y equipos de experimentación usados durante el desarrollo de esta investigación. Se describe a continuación de manera detallada el procedimiento de recolección, preparación y caracterización de las muestras seleccionadas de acuerdo con el Capítulo 2.

1. Recolección de las muestras

La recolección y preparación de muestras de madera para las mediciones es una tarea esencial para un análisis preciso; se debe garantizar que la muestra de ensayo, cuando se analice, proporcione resultados representativos del lote muestreado. Hay dos criterios que deben seguirse al muestrear: que la muestra sea representativa del material a granel, lo que significa que todas las partes del material muestreado deben tener una probabilidad igual de ser recogidas y formar parte de la muestra final para su análisis; y asegurarse de que la muestra no experimente ningún cambio químico o físico después de completar el procedimiento de muestreo y durante el almacenamiento antes del análisis.

Actualmente no existen estándares internacionales que consideren las directrices para los procedimientos de muestreo de maderas en sus diferentes formas (virutas, chips, aserrín). La mejor descripción de los requisitos de muestreo es proporcionada por la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM), **ASTM D2234-02** “Práctica estándar para la recolección

de una muestra en bruto de carbón”. Si bien esta norma está escrita para el muestreo de carbón, describe detalladamente los fundamentos de la toma de muestras de un producto a granel en general. Gran parte del procedimiento es aplicable a la toma de muestras de astillas de madera.

2. Preparación preliminar de las muestras

Se realizó una caracterización preliminar para conocer el contenido de humedad inicial de las muestras tal y como fueron recibidas haciendo uso de una balanza halógena, con un método de calentamiento programado hasta 70 °C y sostenimiento a esta temperatura, hasta asegurar un peso invariable bajo esas condiciones. Se obtuvieron los siguientes resultados, presentados en **Tabla 7-1**.

Tabla 7-1. Porcentaje de humedad de las especies al recibirlas.

Especie	% de humedad al recibirlas
Pino-parte interna.	17,91
Pino-corteza.	42,60
Teca-parte interna.	8,54
Teca-corteza.	12,41
Acacia-parte interna.	Np*
Acacia-corteza.	Np*
*No proporcionada.	

Dicho contenido de humedad se redujo luego de someter el material a un secado natural, con temperatura ambiente promedio de 23 °C y 400 W/m² de radiación solar promedio, durante tres días.

Posteriormente, el material se molió en un molino convencional o robusto, como se le suele llamar, y luego se hizo una segunda molienda en un micromolino fino IKA MF-10, con el fin de obtener diferentes tamaños de partículas entre malla 30 y malla 60, cuya separación fue posible mediante tamices según la Norma **ASTM E-11/95**.

3. Métodos analíticos evaluados

Debido a la inherente complejidad composicional y estructural de las maderas, una caracterización lo más completa posible mediante múltiples análisis permite establecer relaciones entre sus características y su comportamiento en las diferentes aplicaciones.

Análisis último o elemental

El análisis último o elemental proporciona las cantidades relativas de los elementos químicos presentes en la biomasa. Permite estimar, a partir de un balance de materia, la cantidad de productos gaseosos que se generarían en la combustión completa del material, como se explicó en el Capítulo 4.

Aunque existen normas para determinar el contenido de cada componente de manera individual, se utilizan la Norma **ASTM D5373-14** para carbones y la **ASTM E777** para biomasa, que permite la detección de C, H y N de forma simultánea, cubriendo la determinación de dichos componentes por rangos: un método de prueba A aplica para carbono entre 54,7 a 84,7 %wt, hidrógeno en el intervalo de 3,25 a 5,10 %wt y nitrógeno de 0,57 a 1,80 %wt. La prueba B cubre carbono entre 58 a 84,2 %wt para carbones y el rango de 86,3 a 95,2 %wt para coque.

El procedimiento se llevó a cabo en un analizador elemental **CE-440 CHN/O/S Elemental Analyzer de Exeter Analytical**, cuyo horno funciona y mantiene altas temperaturas para garantizar la combustión con oxígeno puro bajo condiciones estáticas; los gases de combustión son medidos automáticamente.^[1] De esta manera se desarrolla una combustión completa y ocurre la reducción del carbono, hidrógeno y nitrógeno a sus correspondientes gases (CO₂, H₂O, N₂ y NOx);^[2] aquellos productos (halógenos, azufre y fósforo) que pueden interferir con el análisis de gases posterior deben ser eliminados.

Los óxidos de nitrógeno (NOx) se reducen a N₂ antes de la detección. El dióxido de carbono, vapor de agua y nitrógeno elemental presentes en la corriente de gas se determinan por procedimientos de detección instrumentales apropiados, generalmente detectores de conductividad térmica de alta precisión, y son directamente proporcionales a cada componente.^[3]

Como aún no existe una norma ASTM que especifique un método directo y satisfactorio para determinar el contenido de oxígeno, este se calcula restando la suma de los otros componentes del análisis final del 100% (CHNS y cenizas).^[4] Este resultado se ve afectado por errores cometidos en la realización del análisis último y también por los cambios en el peso de los constituyentes que forman cenizas en ignición.

Análisis próximo

El análisis próximo proporciona los valores de los contenidos de humedad, volátiles, cenizas y carbono fijo de la biomasa, expresados como porcentaje en peso, mediante procedimientos normativos. Este análisis sirve para identificar la fracción de la biomasa en la que se encuentra almacenada su energía química (compuestos volátiles y carbono fijo) y la fracción inerte (humedad y cenizas),^[5] como se indicó en el Capítulo 4.

El carbono fijo es la fracción que permanece después de haberse desprendido todos los compuestos volátiles (orgánicos e inorgánicos) y es determinado por diferencia entre 100 y la suma del porcentaje de humedad, cenizas y material volátil con los porcentajes dados sobre la misma base de humedad, como lo muestra la siguiente ecuación:^[6]

$$\% \text{ carbono fijo} = 100 - (\% \text{ humedad} + \% \text{ volátiles} + \% \text{ cenizas})$$

El carbono fijo se utiliza como índice de producción de coque a partir de madera y como una medida del material combustible que queda tras la volatilización de compuestos ligeros.

Tradicionalmente, las diversas determinaciones de análisis próximas implican calentar la muestra en el horno bajo condiciones específicas de ASTM; sin embargo, no solo requieren mucho tiempo, sino también una cantidad significativa de muestra. Es así como el análisis próximo se suele llevar a cabo por medio de un análisis macro termogravimétrico en dos etapas, reguladas por la Norma **ASTM D7582-15**. Este procedimiento es rápido, simple, fiable y de alta precisión,^[7,8] y permite determinar la humedad, el material volátil y las cenizas de forma secuencial, siguiendo la pérdida de

masa de una muestra a medida que es sometida a una rampa de temperatura en una atmósfera controlada (nitrógeno/oxígeno). En la **Figura 7-1** se muestra una curva típica de pérdida en masa de una muestra sometida a una rampa de temperatura específica.

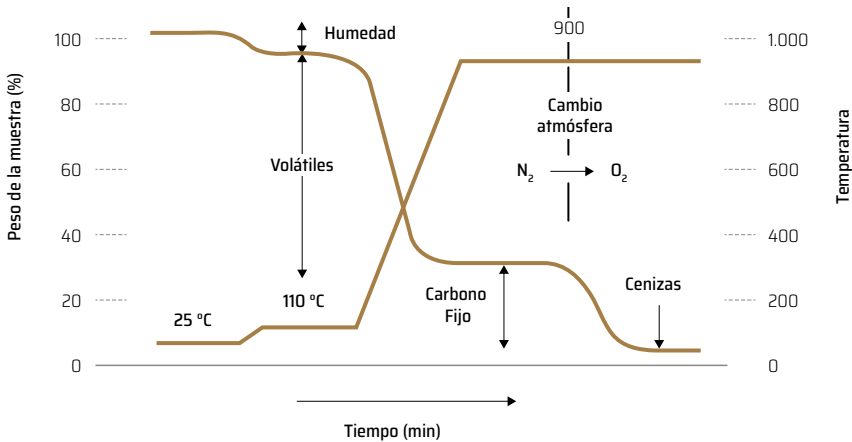


Figura 7-1. Curva termogravimétrica usada para análisis próximo.

Cuando se produce un calentamiento progresivo de una partícula de biomasa, el material se va descomponiendo, y libera primeramente humedad y sustancias volátiles; después se produce la quema del carbono fijo presente y, finalmente, queda un residuo sólido que se relaciona con las cenizas. Cada una de las fracciones se obtiene a una temperatura distinta, bajo condiciones atmosféricas diferentes, y supone una pérdida concreta del material.

La muestra inicialmente fue sometida a un calentamiento lento hasta una temperatura de 110 °C en atmósfera de nitrógeno, constante por 30 minutos; aquí se evidenció la pérdida en masa por humedad. Luego se sometió a una segunda rampa de temperatura, aun con N₂, de modo que se alcanzó 900 °C también con N₂, lo que permitió calcular la cantidad de materia volátil teniendo en cuenta la pérdida inicial. Para determinar el carbono fijo y las cenizas se hizo un cambio de atmósfera de nitrógeno por oxígeno al transcurrir cuatro horas de la prueba, aproximadamente, que se mantuvo hasta

el final de esta. En la norma se encuentran datos específicos del método como flujos de gas, cálculos por realizar, precisión y otros detalles.^[9]

Análisis lignocelulósico

La caracterización de lignina, celulosa y hemicelulosa se puede realizar mediante la implementación de método normativo **NREL/TP-510-42618**, el cual lleva implícitas las normas **ASTM E1721-01(2009)** para la determinación de material ácido insoluble en la biomasa^[10] y **ASTM E1758-01(2007)** para la determinación de carbohidratos mediante cromatografía líquida de alta resolución (HPLC).^[11] En el método, una muestra de biomasa previamente preparada^[12] se somete a hidrólisis con ácido sulfúrico. La solución es filtrada y el residuo sólido secado para determinar la cantidad de lignina insoluble en ácido. Parte del líquido obtenido en la filtración se analiza con un espectrofotómetro para cuantificar la lignina soluble en ácido. El contenido de lignina total es la suma de estos dos resultados.^[13]

La cuantificación de los monosacáridos provenientes de la hemicelulosa (xilosa, galactosa, arabinosa y manosa) y celulosa (glucosa) se hace con el líquido restante obtenido en la filtración durante la hidrólisis con ácido, a través de cromatografía líquida de alta precisión (HPLC). La concentración es calculada teniendo en cuenta el volumen de la solución y el contenido de sólidos totales.^[13] Partiendo del hecho que en la hidrólisis de la celulosa y hemicelulosa hay pérdida de moléculas de agua, es posible establecer su concentración a partir de la concentración de los azúcares monoméricos correspondientes utilizando una corrección anhidro de 0,88 para azúcares C5 (xilosa y arabinosa) y una corrección de 0,9 para azúcares C6 (glucosa, galactosa y manosa).

Determinación de extractivos

Adicional a los extractivos hallados bajo la norma NREL, se realizaron extractos en etanol bajo la Norma **TAPPI T-204 cm-97**.^[14] Para ello, se requirieron 2 g de los sólidos con las características mencionadas anteriormente. La muestra se mantuvo en un equipo Soxhlet entre cuatro y cinco horas, realizando la extracción por agotamiento. Terminado el tiempo, se recuperaron tanto los sólidos como el extracto, que fue posteriormente filtrado. El procedimiento se realizó de manera triplicada para cada especie y cada parte. La cantidad de extraíbles se calculó mediante la siguiente relación.

$$\% \text{ extractivos} = \frac{(Pe-Pb)}{Ps} \times 100\%$$

Pe = Peso seco del extracto. **Pb** = Peso del residuo en el crisol.

Ps = Peso seco de la muestra de madera.

Por otro lado, la extracción en agua fría se realizó bajo la Norma **TAPPI T-207cm-99**.^[15] Para ello se tomaron 2 g de los sólidos previamente clasificados y se sometieron a 300 ml de agua destilada a una temperatura de 23 ± 2 °C durante 48 horas. Pasado el tiempo se lavaron con agua destilada, los sólidos fueron filtrados y secados hasta peso constante.

Finalmente, la extracción en agua caliente se realizó bajo la Norma **TAPPI T-207 cm-99**.^[15] Para ello se tomaron 2 g de los sólidos previamente clasificados y se sometieron a 100 ml de agua destilada caliente por un periodo de tres horas, en el cual se mantuvo el nivel de agua adicionando a una temperatura similar. Terminado el tiempo, la muestra se lavó con agua destilada caliente, se filtró y se secó hasta peso constante.

El porcentaje de extractivos solubles en agua fría y caliente se calculó empleando la siguiente relación.

$$\% \text{ Solubles agua fría o caliente} = \frac{A-B}{A} \times 100\%$$

A = Peso inicial de la muestra seca. **B** = Peso seco de la muestra luego de la extracción.

Determinación del contenido de humedad

Para la medición del contenido de humedad se empleó la Norma **ASTM-4442**.^[16] Se siguió la metodología enunciada como procedimiento B, para la cual se tomó 1 g de cada una de las especies, tanto de su parte interna como de la corteza, y se llevó cada uno hasta peso constante por medio de secados de una hora a 103 ± 5 °C, hasta que la diferencia entre uno y otro secado fuera menor de 2 mg, calculando el contenido de humedad bajo la relación de la siguiente ecuación. Este procedimiento se realizó de forma triplicada y el resultado se obtuvo mediante una media aritmética entre los valores más cercanos.

$$\%CH = \frac{(Ph-Ps)}{Ph} \times 100\%$$

Ph = Peso húmedo de la muestra (gr). **Ps** = Peso seco de la muestra.

Determinación de poder calorífico superior

Se definen dos valores de poder calorífico para un combustible: el poder calorífico superior o bruto (HHV por sus siglas en inglés) y el poder calorífico inferior o neto (LHV por sus siglas en inglés).^[17] El HHV es la entalpía de la combustión completa de un combustible cuando, por ejemplo, todo el carbono es convertido en CO₂ y todo el hidrógeno es convertido en H₂O. Se da para las condiciones estándar (101,3 kPa, 25 ° C) e incluye la entalpía de condensación del agua formada.^[18] El LHV se obtiene cuando no se incluye la entalpía de condensación del agua.

Para la determinación del poder calorífico superior del carbón se siguieron los procedimientos descritos en la Norma **ASTM D5865-13**; se empleó un calorímetro isoperibólico o de bomba adiabática, que mide el cambio de entalpía entre reactivos y productos; aunque este método es sofisticado, también es lento y costoso.^[19] Es por ello que se han desarrollado correlaciones para estimar el poder calorífico usando los resultados de la caracterización físico-química en base seca (análisis elemental [CHNOS] y análisis próximo). Diferentes fórmulas empíricas son descritas en Nhuchhen 2012 y Yin 2011.^[19,20] Los datos obtenidos de este modo sirven para corroborar los resultados de poder calorífico determinado por la norma ASTM.

Determinación de densidad aparente

Las normativas vigentes para la determinación de densidad aparente incluyen **NTC 206-1:2005**, **ISO 13061-2:2014** y **NCh 176/2**. Para aplicarlas se requieren unas probetas, obtenidas de la parte interna de la especie maderable (no es necesario hacer diferenciación entre albura y duramen), lo más planas posible en sus caras para garantizar que el sólido sea regular; además, deben estar libres de imperfecciones tales como poros y grietas, y se deben evitar partes de nudos propios de la madera, todo esto para lograr que el material sea homogéneo. La condición geométrica de la probeta es la siguiente: un prisma cuadrangular de 20x20 mm² en sus caras frontales y 25 mm de longitud, cuya tolerancia dimensional sea de ±5 mm. Debe contarse con tres muestras de la misma especie para garantizar reproducibilidad del experimento.

Dichas probetas fueron inicialmente colocadas en un crisol y secadas en horno hasta una temperatura de 103 ± 2 °C durante una hora, seguido de un enfriamiento controlado en un desecador durante 45 minutos. Posteriormente se realizó una medición de masa para verificar la variación de la misma en la probeta producida por el secado. Se tuvo como criterio una condición de masa constante admitiendo una variación inferior o igual al 0,5% de masa entre dos medidas consecutivas tomadas en un periodo máximo de seis horas. Previamente a este procedimiento descrito se registró la masa inicial de cada probeta.

Finalmente, para el cálculo de la densidad se tuvo en cuenta la expresión que sigue:

$$\rho_a = \frac{Mp_a}{Vp_a}$$

Mp_a = Masa anhidra promedio (g). **Vp_a** = Volumen anhidro promedio (cm³).

El volumen de cada probeta se calculó a partir de las medidas de ancho, alto y largo.

Determinación de pH

Para determinar el pH de las especies maderables se requirieron 2 g de muestra, con un tamaño de partícula entre malla 30 y 60. Se hizo la preparación de la solución utilizando 10 ml de agua destilada: se realizó un proceso de mezclado con un agitador, garantizando que el aserrín quedara totalmente humectado y la mezcla homogénea.

La primera medición de pH (se hizo con un pH metro) trascurridos cinco minutos después de la preparación de la mezcla; los siguientes datos se tomaron a las cuatro, ocho, 24 y 48 horas. Antes de realizar cada medición la mezcla se agitó por un periodo mínimo de 30 segundos con el fin de homogeneizarla y evitar los contenidos sedimentados de aserrín en la base del recipiente. El vaso de precipitado se tapó en su parte posterior con papel vinipel o aluminio para evitar evaporación del solvente y alteración de la concentración de la solución; luego de cada medición, el vaso de precipitado fue tapado nuevamente. El experimento fue realizado a tres soluciones para la misma especie y parte del árbol, para obtener un promedio de los valores registrados en diferentes tiempos.

4. Procesos de conversión termoquímica

Se evaluó el potencial de aprovechamiento con un enfoque hacia la producción de biocombustible de segunda generación, generación térmica.

Torrefacción

La torrefacción de los residuos de madera, con tamaño de partícula de 250 μm , fue llevada a cabo en un reactor horizontal de lecho fijo, que consta de un tubo de cuarzo con 3 cm de diámetro y 91 cm de largo, calentado por resistencias eléctricas controladas mediante una configuración PID, usando dos termopares de tipo K que miden la temperatura del horno y la muestra. El proceso fue desarrollado en una atmósfera inerte de nitrógeno grado analítico (99%) con un flujo volumétrico de 150 ml/min para todas las pruebas.

El sistema fue previamente purgado con N_2 durante 40 minutos para desplazar cualquier porcentaje de oxígeno del ambiente. Se destacan dos rampas de calentamiento: inicialmente, calentamiento dinámico hasta $100\text{ }^\circ\text{C}$, constante por 30 minutos, para eliminar completamente la humedad y proporcionar una base para el análisis, seguido de un último calentamiento hasta la temperatura de proceso, aproximadamente $280\text{ }^\circ\text{C}$, que se mantiene por una hora. El material se deja enfriar de forma natural dentro del equipo. Las etapas anteriormente descritas se esquematizan en la **Figura 7-2**.

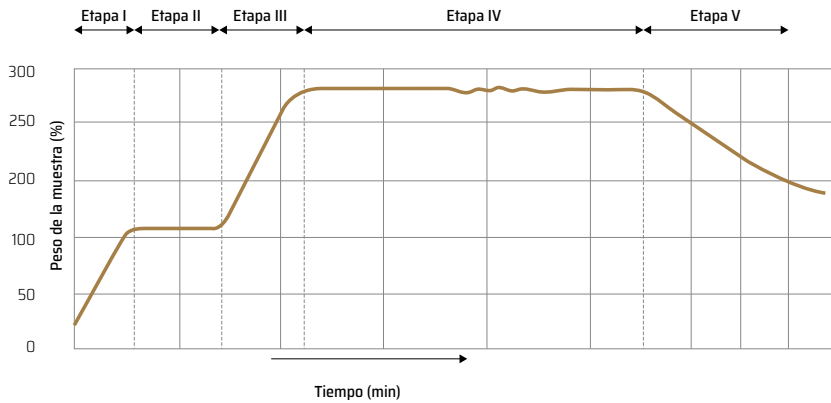


Figura 7-2. Etapas del proceso y rampa de calentamiento utilizada en el proceso de torrefacción. Etapa I: Calentamiento. Etapa II: Presecado. Etapa III: Postsecado y calentamiento intermedio. Etapa IV: Torrefacción. Etapa V: Enfriamiento.

El objetivo de las pruebas de torrefacción es conocer las mejoras en ciertas propiedades físicas de la madera, que se pueden lograr con un proceso de torrefacción. El principio fundamental de la torrefacción, desde un punto de vista químico, es la eliminación del oxígeno y del hidrógeno y el aumento del contenido de carbono en un producto sólido final, reflejado en una relación O/C y H/C más baja. Consecuentemente, el poder calorífico o densidad energética se incrementa en comparación con la madera cruda. Así, se espera apreciar mejoras significativas en la uniformidad de las propiedades, biodegradación y área superficial.

Gasificación

Las pruebas de gasificación con vapor se realizaron en el mismo reactor en el que se realizaron las pruebas de torrefacción. Las muestras fueron llevadas desde temperatura ambiente hasta 850 °C a una velocidad de calentamiento de 30 °C/min y un flujo de N₂ de 150 ml/min para garantizar atmósfera inerte. Una vez la temperatura estuvo en la condición de proceso, se inició el flujo de vapor de agua, obtenido al hacer burbujear una corriente de N₂ en un *impinger* con agua hasta lograr su saturación. El proceso de gasificación isotérmico fue llevado a cabo durante una hora. El esquema experimental se puede apreciar en la **Figura 7-3**.

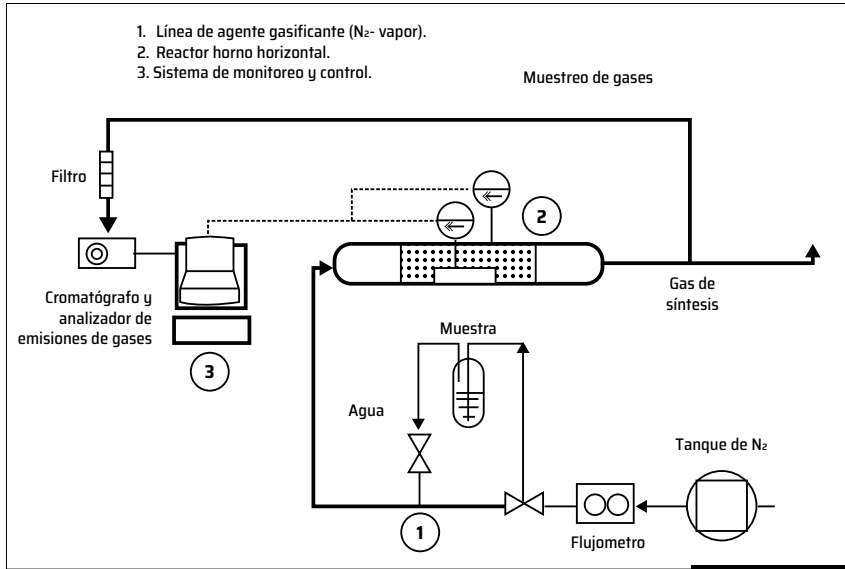


Figura 7-3. Esquema experimental de pruebas de gasificación en reactor horizontal.

El gas de síntesis fue analizado mediante un *bypass* a la salida de gases utilizando un Micro GC Agilent modelo 3.000, con detector TCD, que cuenta con una columna de tamiz molecular 5A de 10 m por 0,32 mm con gas de arraste argón 5,0 y columna plot U de 8 m por 0,32 mm con gas de arraste helio 5,0.

Al sistema se le configuró un método de análisis apropiado para cuantificar las concentraciones v/v de H_2 , O_2 , N_2 , CH_4 , CO , CO_2 , C_2H_4 , C_2H_6 y C_3H_8 . La producción de cada especie gaseosa se determinó con base en la integración de la curva de evolución de los productos para cada especie y el flujo de gas total obtenido de los balances globales de materia.

El objetivo principal de las pruebas de gasificación es conocer el comportamiento de las especies gaseosas, así como el rendimiento de la producción de gas por cantidad de madera alimentada en base *daf* (*dry and ash free*).

Combustión

El material crudo se sometió a combustión en un analizador termogravimétrico STA PT-1.600 LINSEIS para evaluar su reactividad. Aproximadamente 10 mg de material se quemaron bajo cuatro condiciones térmicas diferentes, con velocidades de calentamiento de 5, 10, 15 y 20 °C/min. Antes del proceso de combustión se desarrolló un calentamiento suave a una temperatura de 105 °C durante aproximadamente 30 minutos con el fin de lograr un proceso de secado completo de la muestra. Se realizó una segunda rampa de calentamiento desde esta temperatura a 900 °C con la velocidad de calentamiento considerada. Se obtuvieron curvas DTG para encontrar algunas diferencias entre las especies estudiadas y compararlas. El montaje experimental es el que se describe en la **Figura 7-4**.

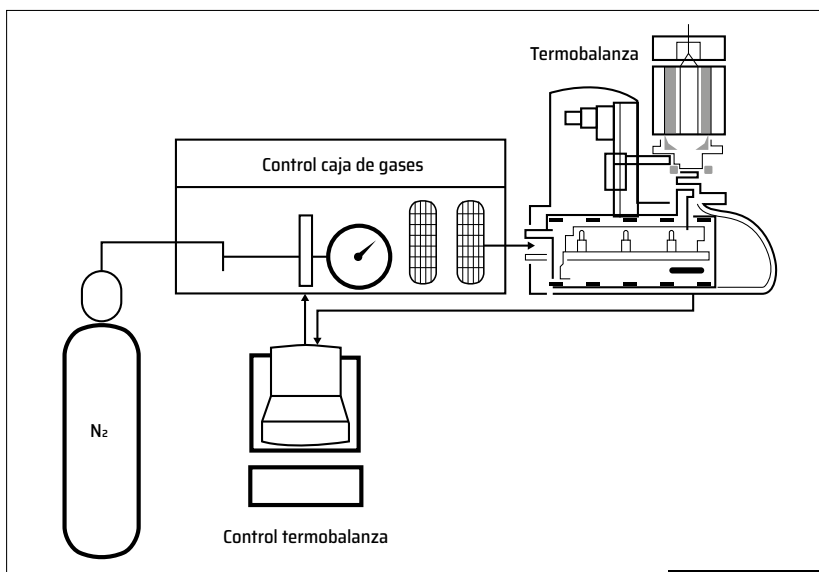


Figura 7-4. Esquema experimental de combustión en TGA.

Las muestras de residuos de madera fueron evaluadas en condiciones de combustión con el fin de analizar su comportamiento y rendimiento, bajo condiciones oxidativas, mediante el análisis de su velocidad de reacción e índice de reactividad.

Referencias bibliográficas

1. Exeter Analytical, “CE440 Elemental Analyzer”, 2015.
2. R. García, C. Pizarro, A. G. Lavín y J. L. Bueno, “Characterization of spanish biomass wastes for energy use”, *Bioresour. Technol.*, vol. 103, n.º 1, pp. 249-258, 2012.
3. D05 Committee, “Test methods for determination of carbon, hydrogen and nitrogen in analysis samples of coal and carbon in analysis samples of coal and coke”, ASTM International, 2014.
4. D05 Committee, “Practice for ultimate analysis of coal and coke”, ASTM International, 2009.

5. F. Nogués, D. García-Galindo y A. Rezeau, “Energías renovables. Energía de la Biomasa”, primera edición, España, 2010.
6. D05 Committee, “Practice for proximate analysis of coal and Coke”, ASTM International, 2013.
7. M. C. Mayoral, M. T. Izquierdo, J. M. Andrés y B. Rubio, “Different approaches to proximate analysis by thermogravimetry analysis”, *Thermochim. acta*, vol. 370, n.º 1-2, pp. 91-97, 2001.
8. R. García, C. Pizarro, A. G. Lavín y J. L. Bueno, “Biomass proximate analysis using thermogravimetry”, *Bioresour. Technol.*, vol. 139, pp. 1-4, 2013.
9. D05 Committee, “Test methods for proximate analysis of coal and coke by, acro thermogravimetric analysis”, ASTM International, 2012.
10. E48 Committee, “Test method for determination of acid-insoluble residue in biomass”, ASTM International, 2009.
11. E48 Committee, “Test method for determination of carbohydrates in biomass by high performance liquid chromatography”, ASTM International, 2007.
12. E48 Committee, “Test method for determination of total solids in biomass”, ASTM International, 2008.
13. H. B. Sluiter, A. S. C. Ruiz, T. D. Sluiter, J. y D. Crocker, “Determination of structural carbohydrates and lignin in biomass. Laboratory Analytical Procedure (LAP)”, National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2011.
14. Technical Association of Pulp and Paper Industry, “T204 cm-97. Solvent extractives of wood and pulp”, TAPPI test methods, p. 12, 1997.
15. Technical Association of Pulp and Paper Industry, “T207cm-99. Water solubility of wood and pulp”, 1999.
16. ASTM, “Standard test methods for direct moisture content measurement of wood and wood-base materials”, *Annu. B. ASTM Stand.*, vol. 92, n.º diciembre, pp. 1-6, 2007.
17. C. Sheng y J. L. T. Azevedo, “Estimating the higher heating value of biomass fuels from basic analysis data”, *Biomass and Bioenergy*, vol. 28, n.º 5, pp. 499-507, 2005.
18. D05 Committee, “Test method for gross calorific value of coal and coke”, ASTM International, 2013.
19. D. R. Nhuchhen y P. Abdul Salam, “Estimation of higher heating value of biomass from proximate analysis: a new approach”, *Fuel*, vol. 99, pp. 55-63, 2012.
20. C.-Y. Yin, “Prediction of higher heating values of biomass from proximate and ultimate analyses”, *Fuel*, vol. 90, n.º 3, pp. 1128-1132, 2011.

Resultados y discusiones

En este capítulo se describen los resultados obtenidos en la investigación. Comprende la caracterización de los residuos de madera de las diferentes especies seleccionadas: *Tectona grandis*, *Pinus patula* y *Acacia mangium*, con miras a proponer las aplicaciones viables para darles uso a los residuos de estas tres maderas.

1. Caracterización preliminar de los residuos madereros

Las muestras obtenidas en el proceso de preparación se muestran en la **Figura 8-1**. Se evidencia un color más oscuro en la transición de corteza a albura-duramen, característico de un aumento de contenido de extractivos.^[1]

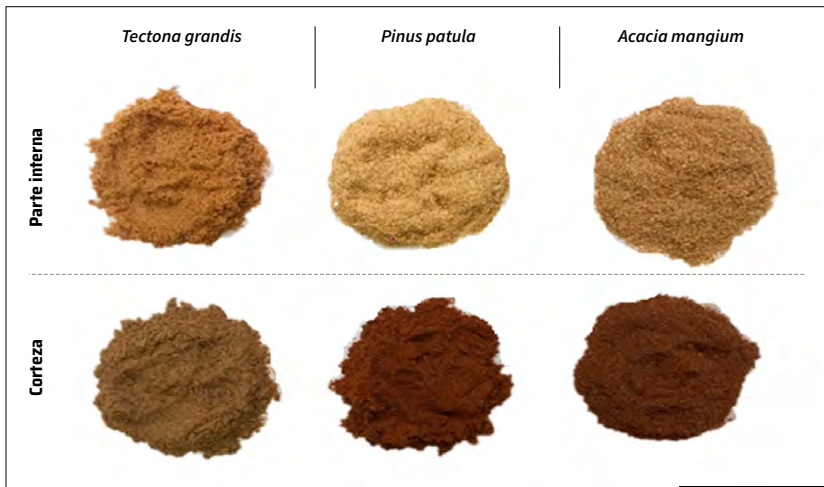


Figura 8-1. Residuos de madera.

La corteza de la *Tectona grandis* es de color marrón claro o gris; su duramen es de color opaco amarillento cuando está fresca y marrón dorado o marrón grisáceo oscuro cuando se expone;^[2] mientras que el color de la albura es blanco amarillento o amarillo pálido marrón.^[2,3] Por lo general, una característica peculiar del Pino pátula es el evidente contraste entre el color rojizo característico de la madera joven y el color marrón de la tardía;^[4] su duramen es de color marrón claro rosáceo y su albura de color blanco amarillento pálido. Por su parte, la corteza de la *Acacia mangium* es de color marrón grisáceo a marrón oscuro, con corteza interior marrón pálido.^[5,6] Su madera presenta poca albura, la cual es crema claro, y su duramen es café claro, con bandas café oscuro y un tinte rosáceo, sin una diferencia marcada con la albura;^[5] no suele haber una clara delimitación entre la albura y el duramen.

Análisis próximo, elemental y lignocelulósico

Los resultados obtenidos para análisis próximo y elemental y para análisis lignocelulósico de los residuos crudos están resumidos en la **Tabla 8-1**. Los detalles de esta evidencian que la mayoría de las muestras estudiadas tienen niveles de humedad inferiores al 10%, lo cual se considera óptimo para los procesos termoquímicos. La presencia de agua en la biomasa influye en su comportamiento durante estos procesos y afecta las propiedades físicas y la calidad de los productos.^[7] Un contenido de humedad por encima del 30% wt dificulta la ignición y reduce el poder calorífico de los productos gaseosos debido a la necesidad de evaporar humedad adicional antes de que ocurra la gasificación/combustión; es decir, se consume más calor, lo que resulta en menos calor utilizable y esto, a su vez, reduce el rendimiento.^[8]

Tabla 8-1. Caracterización de residuos de madera de diferentes especies

Parámetro	<i>Tectona grandis</i>		<i>Pinus pátula</i>		<i>Acacia mangium</i>	
	Corteza	Interno	Corteza	Interno	Corteza	Interno
Análisis próximo (wt %).						
Humedad.	8,63	10,78	10,62	7,54	10,01	10,40
Material volátil (VM).	70,52	71,29	64,73	77,39	59,48	71,76
Carbono fijo (FC).	12,75	15,62	23,18	14,78	26,68	17,42
Cenizas.	8,10	2,31	1,47	0,29	3,83	0,42
<i>Fuel ratio</i> (FC/VM).	0,181	0,219	0,358	0,191	0,449	0,243
HHV (kJ/kg).	14.903	18.581	19.169	18.296	18.556	18.345
Análisis elemental (wt %).						
C	39,68	47,48	49,61	47,29	48,03	48,87
H	4,94	5,6	5,12	5,74	4,73	5,62
N	0,53	0,28	0,44	0,21	0,94	0,28
S	0,04	0,03	0,04	0,03	0,06	0,04
O*	54,81	46,60	44,79	46,73	46,24	45,19
Análisis de fibra (wt % daf).						
Lignina.	32,40	35,60	38,68	32,32	23,72	37,53
Celulosa.	32,22	35,15	20,12	36,56	24,80	40,42
Hemicelulosa.	27,58	22,98	27,51	26,74	17,20	15,12
Extractivos.	7,80	6,27	13,69	4,37	34,27	6,94

Al analizar los datos obtenidos para el contenido de material volátil, se puede observar que todas las muestras, excepto las cortezas de pino y acacia, presentan valores por encima del 70%, y es mucho mayor de lo normal para los combustibles fósiles. La mayoría de ellos siguen el rango generalmente esperado, entre 76 y 86 wt% base seca (db).^[9] Como han señalado algunos autores, un alto contenido de volátiles está directamente relacionado con la reactividad del combustible (la rapidez con que el combustible se convierte en gas) y, por lo tanto, resulta en una mayor conversión del mismo.

En otras palabras, un alto contenido de material volátil favorece las reacciones de desvolatilización, que ocurren principalmente en un proceso de pirólisis, para producir gases permanentes, vapores condensables y char.^[10] Maderas con bajo contenido de material volátil son más adecuadas para gasificación (oxidación parcial).^[11,12]

En cuanto a los resultados de carbono fijo (FC), todas las muestras tuvieron un contenido entre 12 y 26 wt %, rango que concuerda con lo reportado en la literatura para biomásas leñosas: entre 15 y 25 wt %.^[9] El FC representa la fracción de combustible que va a someterse a reacciones de combustión heterogénea; alto contenido de FC indica que el carbón que queda puede ser difícil de encender, pero quemado más lentamente; es decir, se favorece la formación de char (combustión de FC).^[10] Para procesos de gasificación, la conversión del FC en gases determina la tasa de gasificación y su rendimiento. Los gasificadores generalmente funcionan mejor con más contenido de FC.^[13]

En general, la biomasa muestra un alto contenido de volátiles y bajo contenido de FC en comparación con el carbón, lo que hace que sea un combustible altamente reactivo; sin embargo, el FC es poco combustible (quema lentamente) comparado con el material volátil (MV). La relación de carbono fijo y material volátil (FC/MV) indica la facilidad de ignición o el grado de combustibilidad: una baja relación significa que la biomasa es un buen combustible, debido a su alto contenido de MV. Por ejemplo, las biomásas tienen una relación $FC/MV < 0,25$, mientras que en carbones es prácticamente siempre $> 1,0$.^[14]

Se espera que la ceniza tenga valores cercanos al 0,3% para la madera sin corteza, pero los valores generales pueden aparecer en un rango entre el 5% y el 20%, especialmente en la corteza.^[9,15] Bajo contenido de cenizas hace que la biomasa sea más deseable como combustible y tenga un gran beneficio para lograr mayor calidad en productos debido a que incrementa el poder calorífico, facilita la conversión bioquímica y termoquímica, disminuye la corrosividad y la inestabilidad de los aceites de pirólisis, y evita escoriación e incrustaciones en calderas y gasificadores, especialmente cuando la ceniza es alta en óxidos alcalinos y sal, que produce mezclas eutécticas con bajo punto de fusión.^[8,16]

El análisis último no aporta información acerca de la factibilidad de emplear pirólisis, combustión o gasificación, pero tiene relación directa con los productos obtenidos y con algunos comportamientos del proceso. Por lo general, las maderas tienen un contenido de C (47% a 59%), H (5%, 6%, 7%, 0%), O (40% a 45%), N (< 0,1 a 0,5) y S (< 0,01 a 0,05).^[9] Los valores medidos de estos tres componentes están en el rango reportado. Los resultados muestran claramente que estos residuos de madera contienen una mayor proporción de carbono en comparación con el hidrógeno y el oxígeno: el contenido de C y H contribuye positivamente al poder calorífico, mientras que el contenido de O, negativamente.

De la **Tabla 8-1** también se pueden analizar los componentes estructurales (celulosa, hemicelulosa y lignina) de los diferentes residuos madereros. Se puede destacar que la parte interna presenta mayor contenido de celulosa en comparación con la corteza de la misma especie y esta última, a su vez, presenta mayor contenido de extractivos. Diversas investigaciones demuestran que la celulosa y la hemicelulosa son las principales fuentes de compuestos volátiles en la biomasa lignocelulósica.^[13,17] Por ello, la celulosa es una fuente primaria de vapor condensable, el cual condensa como bioaceite o tar. La hemicelulosa contribuye a mayores rendimientos de gases no condensables. La lignina se degrada lentamente debido a su contenido en compuestos aromáticos, haciendo una importante contribución al rendimiento del biochar.^[18]

La **Tabla 8-2** presenta la composición química promedio de las especies coníferas y latifoliadas.^[19]

Tabla 8-2. Composición química de las especies analizadas y del grupo al cual pertenecen, latifoliadas y coníferas.

	Lignina (%)	Celulosa (%)	Hemicelulosa (%)	Extractivos (%)
Latifoliadas	16-24	43-47	25-35	2-8
Coníferas	25-31	40-44	25-29	1-5

Tomada y modificada de^[19]

La *Tectona grandis* es una especie clasificada como latifoliada, para la cual los parámetros obtenidos por NREL (valores presentados en la **Tabla 8-1**) de su parte interna indican un total de lignina de 35,60%, resultado alto en relación con el típico promedio para las especies latifoliadas (este se encuentra entre 16% y 24%), mientras que su contenido de celulosa, 35,15%, está un poco más cercano a los valores típicos mencionados; la hemicelulosa y los extractivos están dentro de los límites.

En relación con el potencial para la producción de pulpa, sea para papel o para rayón, el contenido de celulosa es relativamente bueno, teniendo en cuenta que valores cercanos o superiores al 40% son considerados como adecuados para el proceso;^[20] la consideración en su contenido de lignina es superior al sugerido para la producción de pulpa, que no debería superar el 25%.^[21] El uso de estos residuos de manera directa, sin aplicar un tratamiento previo en un proceso químico o mecánico, implicaría bajos rendimientos en la obtención de celulosa, además de incrementos en el consumo de reactivos y energía, por lo que es recomendado para el desarrollo de pulpa o rayón un tratamiento para reducción de lignina antes de iniciar el proceso de pulpado.

El contenido de extractivos está cercano al límite para el proceso de obtención de pulpa, para el cual se presenta un valor de referencia del 5%. La corteza se descarta para la elaboración de pulpa, de acuerdo con la literatura,^[22] por su contenido de extractivos presentados por las pruebas, además de los bajos niveles de celulosa y altos de lignina.

La *Acacia mangium* está clasificada como especie latifoliada; presenta valores obtenidos por medio de la metodología NREL para su contenido de lignina y hemicelulosa (**Tabla 8-1**) alejados de los representativos para estas especies, según la **Tabla 8-2**.^[23] En relación con el potencial que tiene su parte interna para elaboración de pulpa, se han obtenido valores altos en relación con su contenido de celulosa, 40,42%.^[20]

Por otro lado, sus valores de lignina (37,53%) son muy superiores al 25%,^[21] indicando un consumo adicional de reactivos, pero podría reevaluarse la calidad de la pulpa resultante mediante la aplicación de tratamientos biotecnológicos, bien sea fúngicos o enzimáticos, que permitan modificar

o eliminar lignina. Aunque deberá tenerse cuidado con los contenidos de extractivos, pues sobrepasan el 5% (6,94%). En relación con su corteza, se obtienen valores muy bajos en su contenido de celulosa y muy altos en extractivos, por lo que se descarta para la aplicación en pulpas y rayón.

El Pino pátula es una especie clasificada como conífera. En el análisis obtenido empleando la metodología NREL presenta valores de 32,36%, 36,56%, 26,74% y 4,37 % para lignina total, celulosa, hemicelulosa y extractivos, respectivamente (**Tabla 8-1**); estos valores están cercanos a los típicos promedio para las especies coníferas, como se observa en la **Tabla 8-2**.

Respecto al uso de la parte interna del Pino pátula y de sus residuos en la aplicación para la obtención de pulpa, puede considerarse con potencial en cuanto a su composición química, dado que se han obtenido valores para celulosa y extractivos dentro de los rangos para su aplicación (iguales o superiores al 40% para celulosa y por debajo del 5% para extractivos), por lo que es necesario realizar un pretratamiento para reducir el contenido de lignina. La parte externa del Pino pátula no presenta unas condiciones acordes con la aplicación.

La coloración amarilla del Pino pátula sugiere cierto potencial para la obtención de pulpa de buena calidad; de esta manera, su parte interna es la especie evaluada con mayor afinidad para el uso de pulpa y rayón, aunque la parte interna de la *Acacia mangium* también cuenta con un buen potencial luego de un pretratamiento para la reducción, principalmente, de la lignina; lo mismo ocurre con la Teca parte interna.

Debido al bajo contenido de cenizas de la parte interna de la *Acacia mangium* y el Pino pátula (menor que 1%), así como a su alto contenido de lignina, estas maderas son propicias para la elaboración de *pellets* de acuerdo con los parámetros establecidos en el Capítulo 6. En cuanto a la aplicación de carbón activado, el contenido de ceniza de las maderas debe ser inferior al 8% (la totalidad de las maderas evaluadas cumplen esta condición). Igualmente, se sabe que entre mayor sea su contenido de lignina, más se beneficiará la producción de carbones microporosos, así como la formación de los macroporos entre mayor sea su contenido de material volátil.

Contenido de extractivos

La caracterización del contenido de extractivos de las maderas escogidas permite realizar una valorización cualitativa previa a los análisis químicos en referencia a su potencial para la obtención de pulpa.^[24] A continuación se hace un breve análisis por especie.

En cuanto a la posibilidad de presencia y obtención de taninos en los extractos de la Teca para su aplicación industrial, su rendimiento es muy bajo en relación con valores superiores al 30% enunciados en la bibliografía estudiada como potencial para determinar las maderas o especies empleadas comercialmente;^[25] los valores obtenidos por la metodología NREL son 6,27% y 7,8% para parte interna y corteza, respectivamente, y se consideran relativamente bajos.

Con la metodología TAPPI, a su turno, se destacan durante las extracciones con agua caliente y fría sobre la corteza valores cercanos al 10% (**Tabla 8-3**), indicando la presencia de polifenoles y azúcares,^[26] que se han desprendido como parte de la hemicelulosa soluble y facilitan procesos de remoción de extractivos en la elaboración de pulpa.^[27] Para su aplicación en adhesivos y bioadsorbentes son necesarios análisis posteriores y determinar la cantidad de fenoles y taninos, con el fin de asegurar su viabilidad como fuente para su obtención.

Tabla 8-3. Parámetros obtenidos para residuos provenientes de la especie *Tectona grandis*.

Parámetro	Norma aplicada	Interno (%)	Corteza (%)
Humedad del aserrín.	ASTM-4442	17,82	12,35
Extractivos en etanol.	TAPPI T-204 cm-99	2,84	1,65
Extractivos en agua fría.	TAPPI T-207 cm-99	1,42	8,27
Extractivos en agua caliente.	TAPPI T-207 cm-99	2,65	11,19

El alto contenido de extractivos de la corteza de *Acacia mangium* hallado tanto aplicando la metodología NREL (superior al 30%) como la TAPPI (**Tabla 8-4**) sugiere la presencia de polifenoles y carbohidratos de bajo peso molecular, una fuente potencial para la obtención de taninos (las especies

promisorias presentan valores superiores al 30%). Estos valores están acordes con los reportes de diferentes especies del género *Acacia*, que actualmente son aplicadas de manera industrial; así mismo, los valores obtenidos realizando extracciones con agua en la metodología TAPPI indican la alta composición de la corteza con compuestos polares, lo que fortalece la idea de su aplicación como fuente de taninos para la elaboración de resinas y bioadsorbentes. Los valores aquí reportados son comparables con los hallados para esta especie por Makino *et al.*^[24]

Tabla 8-4. Parámetros obtenidos para los residuos provenientes de la especie *Acacia mangium*.

Parámetro	Norma aplicada	Interno (%)	Corteza (%)
Humedad del aserrín.	ASTM-4442	14,00	14,75
Extractivos en etanol.	TAPPI T-204 cm-99	3,42	30,10
Extractivos en agua fría.	TAPPI T-207 cm-99	2,77	34,13
Extractivos en agua caliente.	TAPPI T-207 cm-99	3,64	40,59

La alta presencia de extractivos solubles en agua para el Pino pátula, como se ve en la **Tabla 8-5**, obtenidos aplicando la metodología TAPPI sugiere también la presencia de polifenoles y azúcares, posiblemente taninos; aunque el rendimiento no es comparable con el obtenido para *Acacia mangium*, es destacable y podría tener potencial para la obtención de taninos dedicados a las diferentes aplicaciones de resinas y bioadsorbentes, con análisis posteriores tales como fenoles totales y porcentaje de taninos condensados para asegurar su viabilidad.^[25]

Tabla 8-5. Parámetros obtenidos para los residuos provenientes de la especie *Pinus patula*.

Parámetro	Norma aplicada	Interno (%)	Corteza (%)
Humedad del aserrín.	ASTM-4442	34,41	14,57
Extractivos en etanol.	TAPPI T-204 cm-99	1,85	9,24
Extractivos en agua fría.	TAPPI T-207 cm-99	1,42	17,06
Extractivos en agua caliente.	TAPPI T-207 cm-99	2,65	17,15

Densidad de las especies maderables

Se realizaron pruebas de laboratorio de acuerdo con el procedimiento para determinación de densidad de la madera en *Acacia mangium*, Pino pátula y Teca. Se tomaron tres probetas de cada especie con el fin de realizar un análisis triplicado, para así obtener un comportamiento promedio y resultados de tendencia que permitan concluir el referente de la densidad anhidra de las especies analizadas, calculando inicialmente la humedad de las muestras, como se observa en la **Tabla 8-6**. La Teca fue la especie que menor contenido de humedad promedio presentó, con 11,5%, seguida de la *Acacia mangium* con 14,2% y de las probetas de Pino pátula, que presentaron pérdida de humedad promedio de 22,5%.

Después de obtener el estado anhidro de cada una de las probetas se tomaron las dimensiones respectivas para calcular el volumen promedio, dato requerido para calcular la densidad anhidra. Los datos se registran en la **Tabla 8-7**.

Tabla 8-6. Contenido de humedad en probetas.

Especie	Probeta	Medición	Pérdida humedad/proceso	% humedad probeta (± 0,1%)	% humedad promedio
<i>Acacia mangium</i>	A1	0	-	14,3%	14,2%
		1	14,03%		
		2	0,24%		
	A2	0	-	14,2%	
		1	14,09%		
		2	0,07%		
	A3	0	-	14,0%	
		1	13,90%		
		2	0,09%		

Continúa en la siguiente página.

Continuación de la Tabla 8-6.

Especie	Probeta	Medición	Pérdida humedad/ proceso	% humedad probeta (± 0,1%)	% humedad promedio
Pino pátula	P1	0	-	22,5%	22,5%
		1	22,45%		
		2	0,01%		
	P2	0	-	22,6%	
		1	22,51%		
		2	0,04%		
	P3	0	-	22,6%	
		1	22,47%		
		2	0,08%		
Teca	T1	0	-	11,4%	11,5%
		1	8,61%		
		2	2,11%		
		3	0,41%		
	T2	0	-	11,6%	
		1	9,69%		
		2	1,48%		
		3	0,25%		
	T3	0	-	11,7%	
		1	8,77%		
		2	2,48%		
		3	0,19%		

Tabla 8-7. Datos de masa y dimensiones de las probetas en estado anhidro.

Especie	Probeta	Masa (g)	Dimensiones (mm)			Dimensiones promedio (cm)		
			a	h	l	a	h	l
<i>Acacia mangium</i>	A1	4,7911	19,02	18,84	25,15	1,89	1,88	2,52
	A2	4,9201	18,67	18,66	25,15			
	A3	4,7841	19,09	18,90	25,36			
Pino pátula	P1	4,8453	19,63	19,65	26,48	1,95	1,97	2,63
	P2	5,1186	19,57	19,66	26,19			
	P3	5,5307	19,19	19,64	26,28			
Teca	T1	5,0503	19,25	19,11	25,04	1,92	1,90	2,52
	T2	5,0413	19,18	18,85	25,18			
	T3	5,0907	19,27	19,03	25,24			

De acuerdo con los resultados expuestos en la **Tabla 8-8**, se identifica que las tres especies tienen una densidad similar y que es menor la del Pino pátula dada su tipología de madera blanda (conífera).

Tabla 8-8. Resultados de densidad anhidra de especies.

Especie	Densidad anhidra promedio (g/cm ³)
<i>Acacia mangium</i>	0,538
Pino pátula	0,513
Teca	0,551

Ahora, los valores de densidad anhidra reportados para la *Acacia mangium*^[29-31] están entre 0,52 y 0,57 g/cm³, y los resultados de los ensayos realizados con un valor de 0,538 g/cm³ se encuentran dentro de este rango. Para Pino pátula, de acuerdo con,^[32-34] el rango de la densidad anhidra está entre 0,347 y 0,750 g/cm³, y el resultado obtenido, con un valor de 0,513 g/cm³, nuevamente está en el rango. Finalmente, para Teca, el rango está definido

entre los valores 0,520 y 0,602 g/cm³ de acuerdo con,^[35-37] y el valor obtenido promedio ha sido de 0,551 g/cm³, también en el rango.

De lo anterior se concluye que los resultados del ensayo de determinación de densidad anhidra son satisfactorios para las especies *Acacia mangium*, Pino pátula y Teca, ya que los valores obtenidos coinciden con la bibliografía reportada.

Además se observa que todas las especies estudiadas pueden ser usadas en la elaboración de tableros, debido a que los contenidos de humedad requeridos para esta aplicación, como se observó en el Capítulo 6, están entre el 6-18%. Hay que decir que es necesario un proceso de secado mayor para Pino pátula.

pH de las especies maderables

Se ejecutaron pruebas de laboratorio con el objetivo de determinar el nivel de pH de las tres especies. Este proceso de medición del nivel de acidez se llevó a cabo en mezclas preparadas en proporciones de 1/10, siendo la primera parte correspondiente a la muestra de aserrín de madera, considerado como el soluto, y la segunda a agua destilada, considerada como el solvente. Con esta especificación se prepararon las mezclas con 2 g de madera y se obtuvo material particulado a partir del paso de aserrín en malla 30 y retenido en malla 60, con una tolerancia de 0,010 g, haciendo uso de la balanza analítica. Para el solvente se utilizaron 20 ml de agua destilada. Dichas soluciones fueron contenidas en beakers de 50 ml.

Se prepararon seis soluciones para cada especie, tres de ellas dedicadas a estudiar la parte interna (compuesta por aserrín obtenido de albura y duramen) y las tres restantes para analizar la corteza. Al estudiar el comportamiento de tres muestras en las variaciones mencionadas, se pretendió obtener un patrón de comportamiento de pH respecto al avance del tiempo y calcular de forma más acertada el valor de pH para la especie a través de un promedio, que en comparación con el muestreo de una única solución, tanto para parte interna como externa, no proporcionaría tendencias de comportamiento. Así, en total se prepararon 18 soluciones.

Las mediciones se realizaron durante tiempos establecidos posteriores a la preparación de las mezclas en el siguiente orden: 5 minutos, 4, 8, 24 y 48 horas para todas las especies, con excepción de las muestras de corteza de Teca, para la cual se realizó una medición adicional pasadas 72 horas. Los datos obtenidos se registran en la **Tabla 8-9**.

Tabla 8-9. Resultados de medición de pH.

Especie	Muestra	Tiempo						pH promedio	Desviación estándar
		Minutos	Horas						
		5 min	4 h	8 h	24 h	48 h	72 h		
Ac. int.	AI1	5,41	5,14	5,00	4,93	4,96	---	5,11	0,152
	AI2	5,34	5,16	5,13	4,92	5,05	---		
	AI3	5,37	5,14	5,13	4,99	5,00	---		
Ac. cort.	AC1	4,65	4,49	4,48	4,46	4,45	---	4,51	0,066
	AC2	4,64	4,50	4,49	4,46	4,49	---		
	AC3	4,61	4,48	4,44	4,48	4,47	---		
Pin. int.	PI1	5,42	5,59	5,48	5,17	5,18	---	5,39	0,121
	PI2	5,44	5,50	5,47	5,36	5,27	---		
	PI3	5,48	5,46	5,44	5,34	5,24	---		
Pin. cort.	PC1	4,53	4,37	4,27	4,15	4,30	---	4,32	0,149
	PC2	4,61	4,36	4,31	4,28	4,31	---		
	PC3	4,58	4,33	4,26	4,06	4,15	---		
Tec. int.	TI1	6,84	6,72	6,72	6,62	6,58	---	6,71	0,101
	TI2	6,94	6,71	6,71	6,63	6,61	---		
	TI3	6,86	6,75	6,72	6,63	6,60	---		
Tec. cort.	TC1	7,25	6,95	6,94	6,23	6,21	6,17	6,21	0,025
	TC2	7,19	7,01	6,93	6,25	6,20	6,25		
	TC3	7,16	7,01	6,87	6,19	6,22	6,20		

En la **Tabla 8-9** se puede evidenciar la tendencia de disminución desde la medición inicial de los valores de pH con respecto al tiempo; esto indica que las soluciones tienden a hacerse más ácidas. En adición, los resultados permiten concluir que la parte interna, compuesta por albura y duramen, es de tipo ácido, al igual que la corteza, aunque esta última tiene un pH más ácido aún.

Para aplicaciones en otros materiales compuestos como el fibro-cemento, la *Acacia mangium* parte interna resulta ser prometedora dado su bajo contenido en hemicelulosa, aunque, como los extractivos, se recomienda que esté por debajo del 4%, y se requiere un pretratamiento para la reducción de los mismos, por cuanto, según la **Tabla 8-1**, estos se encuentran en casi 7%; así mismo, se cumple el parámetro para el pH, el cual debe ser inferior al 5%. En la aplicación de madera plástica se identifica el uso de todas las maderas evaluadas para su preparación.

Para la aplicación de compostaje, dado el pH obtenido para las diferentes muestras evaluadas, se identifica que todas cumplen la condición de pH entre el 5% y el 8%, excepto las cortezas de Pino pátula y Acacia. Además, el contenido de extractos debe ser tratado para reducirse a niveles por debajo del 2% y eliminar fitotoxicidad.

2. Caracterización de madera torrefactada

El cambio de color de la biomasa se considera un indicador del grado de la torrefacción y está atribuido a cambios de composición físico-química, como consecuencia de la oxidación de compuestos fenólicos, formación de formaldehído y quinina, y, en especial, por procesos de caramelización de la holocelulosa y formación de sistemas de anillos aromáticos asociados con reacciones de aromatización y policondensación de la lignina.^[38,39] Al recoger las muestras torrefactadas del reactor, se observó un color uniforme en el interior del cuerpo de la muestra, el cual era más oscuro que la madera inicial, como se puede apreciar en la **Figura 8-2**, lo que demuestra que se dio una torrefacción sin gradientes de temperatura y cinéticamente controlada.

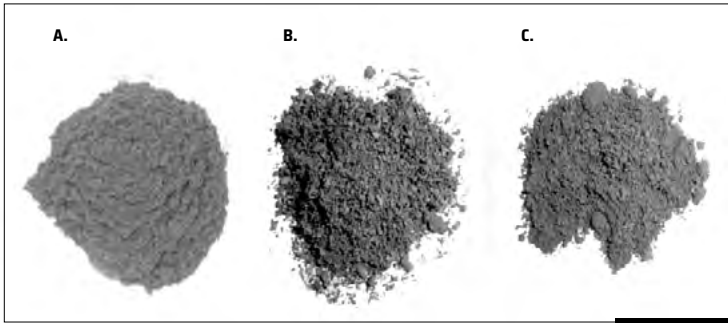


Figura 8-2. Residuos de madera torrefactados. **A.** *Tectona grandis*. **B.** Pino pátula. **C.** *Acacia mangium*. Todos corresponden a la parte interna.

Los resultados obtenidos para el análisis elemental y el poder calorífico son mostrados en la **Tabla 8-10**. Se pueden notar las alteraciones que se producen en la composición química de la madera cuando está expuesta a condiciones de torrefacción: el contenido de carbono se incrementa, mientras que se observan disminuciones en el contenido de hidrógeno y oxígeno, lo cual es habitual debido a la mayor liberación de componentes volátiles oxigenados e hidrogenados que llevan consigo algunos de estos componentes y que densifican el contenido de carbono.

Tabla 8-10. Análisis próximo y elemental de residuos de madera torrefactados.

Parámetro	<i>Tectona grandis</i>		Pino pátula		<i>Acacia mangium</i>	
	Corteza	Interno	Corteza	Interno	Corteza	Interno
Análisis próximo (wt %).						
Humedad.	7,529	3,796	4,959	3,631	5,870	3,241
Material volátil (VM).	56,045	48,305	54,915	67,705	45,245	62,946
Carbono fijo (FC).	27,926	45,105	38,602	28,134	44,861	33,441
Cenizas.	8,499	2,794	1,524	0,530	4,024	0,373
<i>Fuel ratio</i> (FC/VM).	0,498	0,934	0,703	0,416	0,992	0,531
HHV (kJ/kg).	18,837	24,540	23,785	22,974	23,842	25,265

Continúa en la siguiente página.

Continuación de la Tabla 8-10.

Parámetro	<i>Tectona grandis</i>		Pino pátula		<i>Acacia mangium</i>	
	Corteza	Interno	Corteza	Interno	Corteza	Interno
Análisis elemental (wt. %).						
C	61,495	65,095	61,825	58,805	64,17	59,345
H	3,74	4,615	4,42	5,33	4,22	5,115
N	0,35	0,005	0,165	0	0,91	0,005
O	34,42	30,285	33,59	35,87	30,70	35,54

Los componentes a los que se les da mayor importancia en este análisis son el carbono y el oxígeno, ya que al someterlos a una transformación termoquímica como la combustión, gasificación o pirólisis, reaccionan de manera exotérmica y forman CO₂ y H₂O. Así, las grandes proporciones de C y H contribuyen de manera positiva al poder calorífico superior (HHV) del material, por lo que la madera final tiene un aumento significativo en dicho poder, lo que la hace un material atractivo para procesos térmicos posteriores. Con respecto al oxígeno, se podría pensar que un alto contenido es conveniente porque se requiere menos oxígeno para la gasificación; sin embargo, la disminución del poder calorífico no favorece los procesos termoquímicos.

Una imagen de las relaciones moleculares de carbono, hidrógeno y oxígeno en el diagrama de Van Krevelen ayuda a clasificar los combustibles sólidos de acuerdo con su grado de carbonización. En la **Figura 8-3**, se evidencia un cambio en la composición elemental de la biomasa torrefactada y, como consecuencia, la obtención de un buen grado de carbonización: la mayoría de las muestras son movidas hacia la parcela del lignito. Sin dudas, la motivación de la torrefacción es maximizar los rendimientos de masa y energía, con reducción de las relaciones O/C y H/C.^[40,41]

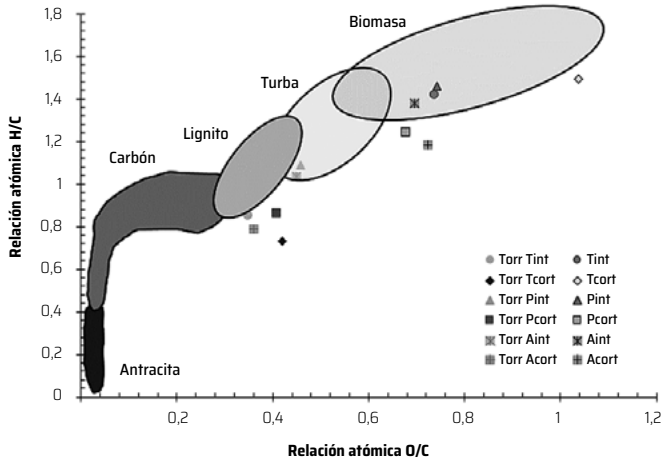


Figura 8-3. Diagrama Van Krevelen para residuos de madera crudos y torrefactados.

Por otra parte, con el análisis próximo presentado en la **Figura 8-4** se aprecia que el contenido de material volátil disminuye notablemente con un aumento, a su vez, del carbono fijo. Esto se puede contrastar con un aumento de la relación FC/MV en los torrefactos, como consecuencia de la densificación del contenido de carbono. El contenido de ceniza se mantuvo constante a través de todo el proceso, por lo que su fracción se incrementa ligeramente.

Los resultados obtenidos están en concordancia con lo expuesto por Bridgeman *et al.*, quienes demostraron que la tendencia en la torrefacción es hacia una reducción del material volátil y un aumento en el contenido fijo de carbono y cenizas, lo que crea un producto más estable térmicamente, pero también uno que produce mayores calores de reacción durante la combustión.^[42] Esto potencializa el uso del torrefacto como combustible sólido, ya que al tener mayores contenidos de carbono, se aporta más cantidad de energía en otros procesos termoquímicos como la combustión.^[43]

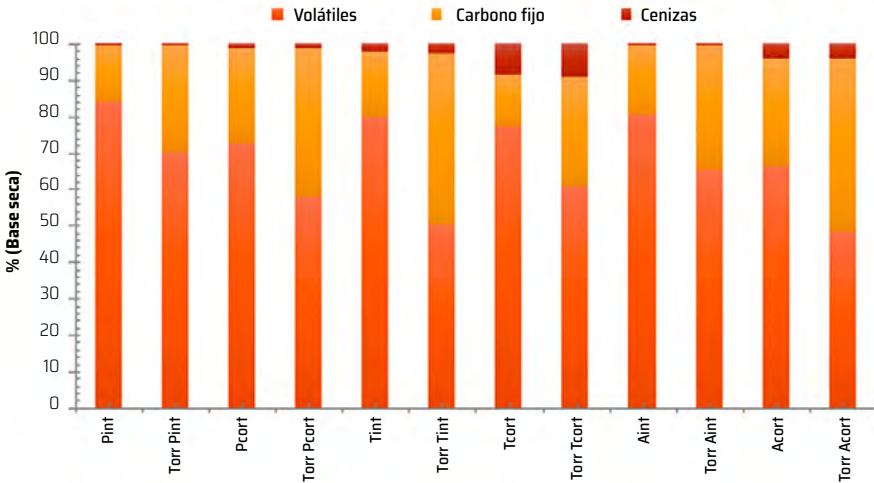


Figura 8-4. Análisis próximo para residuos de madera crudos y torrefactados.

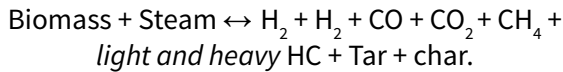
El poder calorífico de las muestras es aumentado en el proceso de torrefacción. En comparación con el material crudo, se presenta un incremento medio del 28% para *Tectona grandis*, del 25% para Pino pátula y del 33% para *Acacia mangium*. Lo anterior confirma que el proceso de torrefacción altera la estructura química de la biomasa: aumenta su contenido de carbono, mientras que reduce su contenido de oxígeno e hidrógeno, lo que lleva a un aumento de la densidad de energía.

Se considera, entonces, que el producto sólido de torrefacción (char) presenta buenas propiedades energéticas como para considerarse un combustible sólido de mucho potencial para el sector de las energías alternativas y, de acuerdo con los resultados observados, la corteza del Pino pátula y de la *Acacia mangium* y la parte interna de la Teca son consideradas aptas para continuar con un proceso de gasificación.

3. Comportamiento del gas de síntesis obtenido vía gasificación

Con base en el análisis preliminar realizado a las maderas crudas presentado en la sección *Caracterización preliminar de los residuos madereros*, se escogieron tres muestras con potencial para ser evaluadas en un proceso de gasificación debido a su alto contenido de carbono y bajo contenido de material volátil. Dicha selección fue confirmada con los datos de la relación FC/VM de cada muestra, expuestos en la **Tabla 8-1**, teniendo en cuenta que maderas con alta relación FC/VM son favorables en un proceso de gasificación. Así, la parte interna de la *Tectona grandis* y las cortezas de Pino pátula y *Acacia mangium* se gasificaron a una temperatura que permitía una conversión casi completa a H₂, CO y CO₂; 850 °C; y la relación vapor de agua/ carbono (o *steam/biomass*) se fijó en un valor de 0,35, para tener la misma cantidad de agua disponible para la reacción de gasificación.

La gasificación de biomasa utilizando vapor como agente gasificante se puede simplificar por la ecuación que sigue:



El suministro de vapor aumenta la presión parcial de H₂O dentro de la cámara de gasificación, que favorece la reacción primaria de gasificación (C + H₂O ↔ CO + H₂), la reacción *shift* (CO + H₂O ↔ CO₂ + H₂) y la reacción de reformado de metano (CH₄ + H₂O ↔ CO + 3H₂), dando así lugar a una producción incrementada de H₂, CO y CO₂. Sin embargo, la temperatura de gasificación debe ser lo suficientemente alta (por encima de entre 750 y 800 °C) para que el reformado con vapor y las reacciones agua-gas sean favorecidas. La evolución del gas productor obtenido permite evidenciar el desarrollo eficiente del proceso de gasificación con vapor.

La composición en volumen de las diferentes especies características de este gas se presenta en la **Figura 8-5**. Para comprobar la reproducibilidad del proceso, cada experimento se hizo por duplicado, bajo las mismas condiciones experimentales; un error relativo entre las mediciones de

composición del *syngas* menor del 5% fue considerado aceptable. El análisis indicó que la gasificación estaba realmente completa: la concentración de CH_4 y otros hidrocarburos como C_2H_2 y C_2H_4 era inferior a 30 ppm, el límite de detección de los analizadores.

El comportamiento mostrado por las diferentes especies en el gas productor, principalmente H_2 y CO_2 , indica la predominancia de la reacción primaria de gasificación. Se puede apreciar que se tiene un máximo al inicio del paso de vapor, que va decreciendo a medida que pasa el tiempo hasta mantenerse en un valor estable. Esto puede deberse a competencia entre las reacciones primarias y *shift*, e, incluso, a la ocurrencia de problemas difusionales por el tamaño de partícula y baja área superficial, que llevan a una menor velocidad de consumo de carbono, a un lento desarrollo de las reacciones de gasificación y, por consiguiente, a una menor generación de H_2 y CO .

El gas productor derivado del proceso de gasificación puede ser utilizado directamente como gas combustible para una unidad de combustión o convertido en hidrógeno y utilizado como combustible para pilas de combustible. Además, también se convierte en gas de síntesis que contiene principalmente hidrógeno y monóxido de carbono, y puede utilizarse como materia prima para la síntesis y producción a gran escala de productos básicos importantes de la química orgánica.

El estudio de diferentes propiedades del gas productor permite evaluar su facilidad de uso en varias aplicaciones. Por ejemplo, se requiere gas de síntesis con una relación molar H_2/CO de aproximadamente 1,0 para el proceso de oxosíntesis en la producción de aldehído y alcohol, mientras que se requiere una relación H_2/CO cercana a 2,0 para la producción de combustibles de síntesis Fischer-Tropsch y metanol.^[44,45]

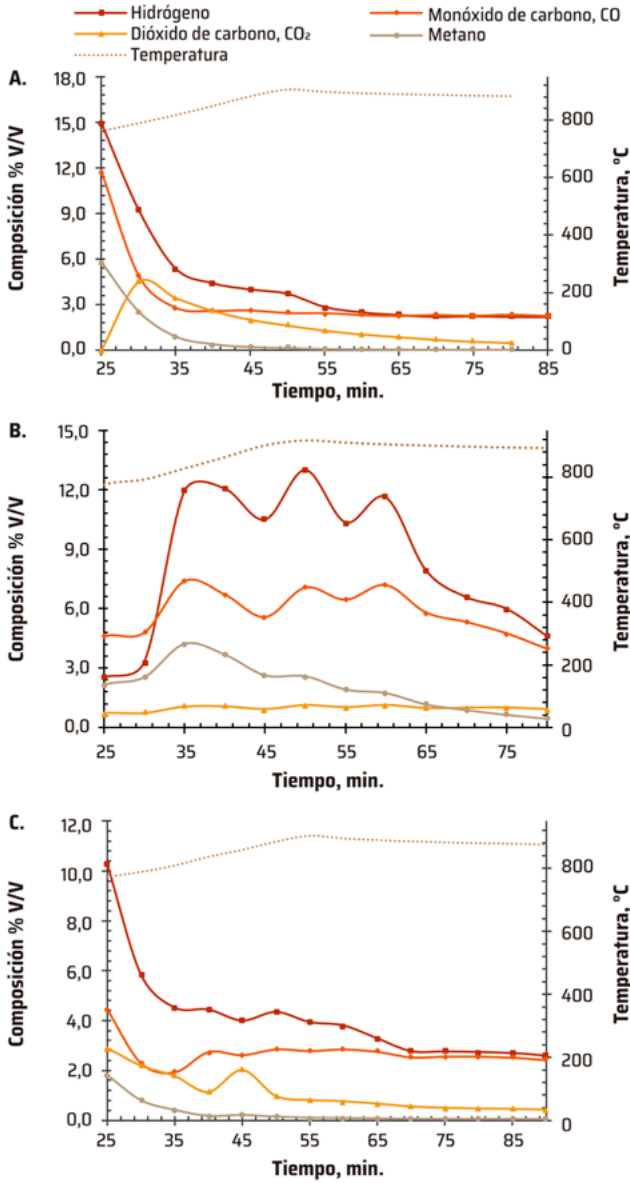


Figura 8-5. Composición del syngas obtenido de: **A.** Pino pátula. **B.** *Tectona grandis*. **C.** *Acacia mangium*.

El rendimiento del gasificador se mide en términos de calidad y cantidad de gas producido. La cantidad de biomasa convertida en gas se expresa por eficiencia de gasificación. La calidad del producto se mide en términos de valor de calentamiento, así como la cantidad de gas producto deseado. Se estudiaron los siguientes parámetros: a) poder calorífico inferior del gas productor, LHV (MJ/kg), calculado a partir de la composición del gas productor (en seco) y del valor correspondiente para las especies combustibles (CO, H₂, CH₄, C₂H₄ y C₂H₆); b) rendimiento de gas productor, GY (kg de gas seco/kg de biomasa *daf*), caudal de gas productor seco con respecto al caudal de biomasa; y c) relación hidrógeno/monóxido de carbono en el gas productor, H₂/CO. Los resultados son presentados en **Tabla 8-11**.

Tabla 8-11. Rendimiento de gas rico en hidrógeno obtenido de gasificación de madera con vapor de agua en un reactor cilíndrico horizontal.

Parámetro	Corteza	Parte Interna	
	Pino pátula	<i>Acacia mangium</i>	<i>Tectona grandis</i>
Condiciones de operación.			
Flujo de alimentación (kg/h).	4,28	3,90	8,14
Flujo de vapor de agua (kg/h).	0,0035	0,0035	0,0035
Tiempo de proceso (h).	2	2	2
Relación vapor-biomasa (S/B).	0,35	0,35	0,35
Distribución de productos.			
Char.	21,96	24,79	17,40
Gas productor.	30,37	46,85	22,13
Humedad en el gas productor.	47,67	28,36	60,47
Composición del gas (volumen %, <i>dry, inert free</i>).			
H ₂	41,75	48,64	48,47
CO ₂	19,51	12,59	5,65
CO	35,75	34,18	33,62
CH ₄	2,34	4,46	11,84

Continúa en la siguiente página.

Continuación de la Tabla 8-11.

Parámetro	Corteza	Parte Interna	
	Pino pátula	<i>Acacia mangium</i>	<i>Tectona grandis</i>
C ₂ H ₄	0,32	0,08	0,19
C ₂ H ₆	0,34	0,06	0,24
H ₂ /CO ratio.	1,17	1,42	1,44
Low heating value (MJ/Nm ³).	11,21	12,38	15,42
Gas yield (kg product gas/ kg biomass).	35,70	59,28	26,97

Con los datos obtenidos de las pruebas, así como la caracterización de productos, la composición del gas de síntesis y el análisis último del residuo generado, fue posible realizar el balance global de materia para cada experimento. Lo anterior permitió conocer la distribución de productos y el rendimiento del gas productor.

Se puede establecer que la *Acacia mangium* es la especie que generó un gas de síntesis con mejores características al tener mayor producción de H₂ y CO, cuya proporción es de 47% y 33% volumen en base seca y libre de inertes, respectivamente. Es de destacar que la *Tectona grandis* genera un gas con menores cantidades de CO₂ en comparación con la distribución de gases de las demás especies estudiadas, que en contraste con la alta humedad del gas demuestra la dificultad que tiene este material para reaccionar con el vapor alimentado y menor disponibilidad de material carbonoso por reaccionar. Finalmente, el gas obtenido de Pino pátula presenta la mayor proporción de CO₂, como consecuencia de reacciones de repolimerización y carbonización de la lignina y otras reacciones secundarias que producen compuestos de tipo aldehído a altas temperaturas.

El poder calorífico del gas de síntesis obtenido está influenciado por su composición química: dado que solo H₂, CO, CH₄, C₂H₄ y C₂H₆ son combustibles, el HHV de *syngas* es el valor calorífico de estos gases. Es evidente que el mayor contenido energético lo presenta el gas que proviene de la *Tectona grandis*, lo cual se debe, principalmente, a su proporción más baja de CO₂ y alta de CH₄, que favorece la calidad energética del gas producto, a pesar de que este esté compuesto mayoritariamente por H₂.

El gas obtenido con *Acacia mangium*, que posee mayor contenido de H₂ y menor contenido de CO₂ comparado con el Pino pátula, presenta un valor intermedio porque el aporte energético del CO en masa es más significativo que el del H₂. Es importante destacar que los poderes caloríficos calculados son bajos comparados con los obtenidos en una aplicación real de gasificación con vapor de agua, pero esto se debe a que el gas obtenido está diluido, generalmente, en un 86% volumen de nitrógeno.

4. Pruebas de reactividad

Las pruebas de reactividad, como se describió en secciones anteriores, fueron llevadas a cabo con dos rampas de temperatura, como se puede apreciar en la **Figura 8-6**. La primera rampa a 105 °C, con 30 minutos de residencia, y la segunda rampa a 105 °C-900 °C, con velocidad de calentamiento de 5, 10 y 15° C/min. En la **Figura 8-6** se muestra el TGA y DTG para todas las muestras, para una velocidad de calentamiento de 10 °C/min.

Los resultados muestran una tendencia a la pérdida de masa esperada para cada uno de los materiales evaluados. Al principio se evidencia una mínima pérdida en masa, producto de la deshidratación de la muestra. No obstante, se produce una rápida pérdida de masa durante el período de calentamiento (dinámico), que se desacelera con una pérdida de peso más lenta, hasta permanecer constante.

La pérdida de masa es más evidente para las muestras de parte interna, como resultado del alto contenido de volátiles en su estructura, como se verifica en la **Tabla 8-1**.

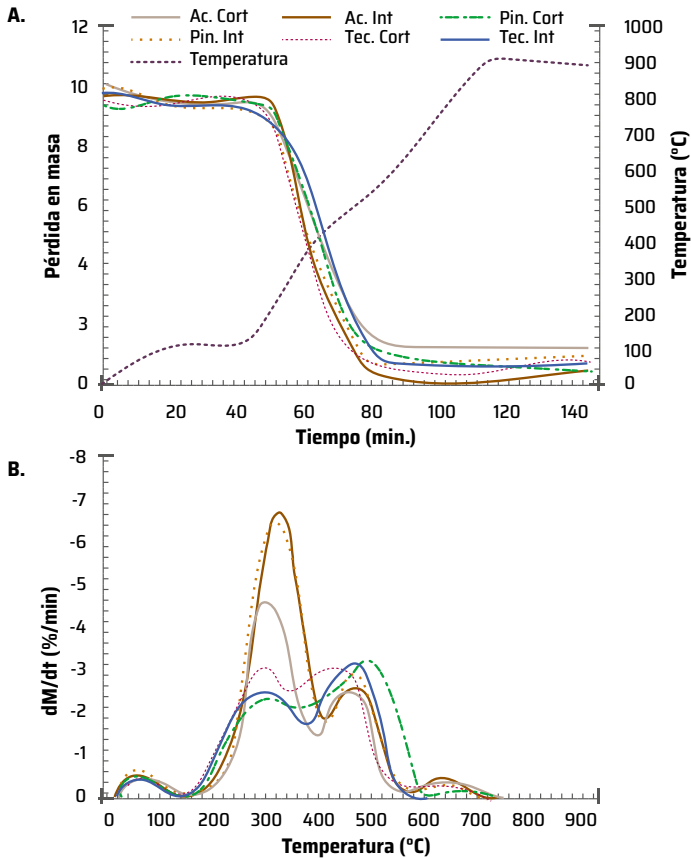


Figura 8-6. Muestras de residuos de madera bajo condición de combustión a velocidad de calentamiento 10°C/min. **A.** TGA. **B.** DTG.

La pérdida de masa es el resultado de la pérdida de humedad y descomposición (desvolatilización), en particular de la celulosa y parte de la lignina. Las curvas DTG proporcionan una gran información al observar los pasos de la descomposición de la biomasa de acuerdo con cada componente, que se degradan en distintos momentos debido a diferencias en su estabilidad térmica. El primer pico que aparece, alrededor de 90 °C, corresponde a la fase de secado, con una pérdida de humedad del material. Un pico presentado a una temperatura de alrededor de 303 °C corresponde a la descomposición de la celulosa. Se puede observar que este es menor para las muestras de la

corteza de las especies estudiadas, lo que indica que la cantidad de celulosa de estas muestras es menor comparada con el contenido que tiene la parte interna de las mismas especies. Este comportamiento es consistente con los resultados presentados en **Tabla 8-1**.

El pico final en las curvas DTG se atribuye a la lignina y otros materiales carbonosos producidos en las reacciones primarias. Las muestras de parte interna presentan el menor pico en comparación con las muestras de corteza. Sin embargo, muchos autores han coincidido en que los polímeros de hemicelulosa y la celulosa, debido a su descomposición primaria, producen un carbón formado, principalmente, por estructuras aromáticas que proporcionan y aumentan las estructuras aromáticas en el material; por ello, no existe una diferencia marcada de la descomposición de lignina en corteza y parte interna. Es de destacar que los valores de temperatura en los que se observan los dos picos en este experimento no corresponden necesariamente a la temperatura de la descomposición por separado de cada componente.

Con el fin de conocer la reactividad de las muestras, se obtuvo la distribución de la energía de activación que describe el comportamiento de cada material en el proceso de combustión; esto se muestra en la parte a) de la **Figura 8-7**. El procedimiento se realizó mediante el método isoconversional de Ozawa, mediante el cual se puede obtener una distribución de las energías de activación para todo el espectro de conversión.

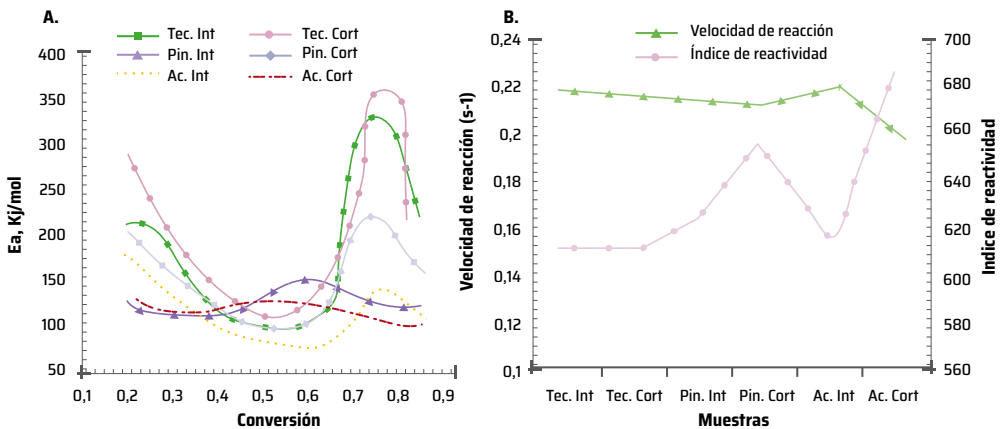


Figura 8-7. A. Distribución de la energía de activación por método isoconversional de Ozawa. B. Velocidad de reacción e índice de reactividad para residuos de madera en un proceso de combustión.

Aunque muchos autores miden la reactividad de un material cuando se alcanza la velocidad máxima de pérdida de masa en el proceso, en este trabajo se escogió medirlo al porcentaje 0 de la conversión. En se puede observar la reactividad de las diferentes muestras. El índice de reactividad indicado corresponde a un valor de temperatura en el que la descomposición alcanza el valor de 50%. Mientras que el índice de reactividad es mayor, el material evaluado presenta una menor reactividad; así, la corteza de la *Acacia mangium* presenta la menor reactividad, mientras que la parte interna de la Teca sería la más reactiva. Así mismo, el índice de reactividad se puede determinar con base en el contenido de volátiles, ya que la cantidad de estos refleja directamente la reactividad del material.

Como se pudo observar, los desechos de madera no solo son una oportunidad para generación de energías limpias, sino también de productos renovables para aplicaciones industriales: espumas de base biológica, plásticos, fertilizantes, lubricantes, materiales compuestos, adsorbentes, productos químicos industriales, entre otros.

Referencias bibliográficas

1. R. B. Miller, "Structure of wood", Wood Handbook: wood as an engineering material, Madison, WI: USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, pp. 2-1, 2-4 ,1999.
2. A. S. Nordahlia, S. C. Lim, H. Hamdan y U. M. K. Anwar, "Wood properties of selected plantation species: *Tectona grandis* (teak), *Neolamarckia cadamba* (Kelempayan/Laran), *Octomeles sumatrana* (Binuang) and *Paraserianthes falcataria* (Batai)", Ministry of Natural Resources and Environment, Malaysia, n.º 54, pp. 1-8, 2014.
3. The wood database, "The wood database", Teak. [En línea]. Disponible: <http://www.wood-database.com/teak/>.
4. Y. Jácome, "Potencial productivo de un ensayo de progenies de 4.ª generación de selección de *Pinus patula schl.* et Cham. en Potrero de García municipio de Tlacolulan", Universidad Veracruzana, 2011.
5. H. Krisnawati, M. Kallio, and M. Kanninen, "*Acacia mangium* willd. Ecology, silviculture and productivity", Cent. Int. For. Res., p. 26, 2011.
6. C. Orwa, A. Mutua, R. Kindt, R. Jamnadass y S. Anthony, "*Acacia mangium* Willd", Agroforestry Database 4.0., pp. 1-5, 2009.

7. A. Demirbas, "Potential applications of renewable energy sources, biomass combustion problems in boiler power systems and combustion related environmental issues", *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 31, n.º 2, pp. 171-192, 2005.
8. P. McKendry, "Energy production from biomass (part 3): gasification technologies", *Bioresour. Technol.*, vol. 83, n.º 1, pp. 55-63, 2002.
9. C. Telmo, J. Lousada y N. Moreira, "Proximate analysis, backwards stepwise regression between gross calorific value, ultimate and chemical analysis of wood", *Bioresour. Technol.*, vol. 101, n.º 11, pp. 3808-3815, 2010.
10. M. I. Jahurul, M. G. Rasul, A. A. Chowdhury y N. Ashwath, "Biofuels production through biomass pyrolysis-A technological review", *Energies*, vol. 5, n.º 12, pp. 4952-5001, 2012.
11. R. C. Brown, "Thermochemical processing of biomass: conversion into fuels, chemicals and power", primera edición, Chichester, Reino Unido: John Wiley & Sons, Ltd., 2011.
12. K. J. Ptasiniski, "Efficiency of biomass energy: an exergy approach to biofuels, power, and biorefineries", Wiley, 2016.
13. P. Basu, "Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction: practical design and theory", segunda edición, Elsevier Inc., 2013.
14. S. V. Vassilev, C. G. Vassileva y V. S. Vassilev, "Advantages and disadvantages of composition and properties of biomass in comparison with coal: an overview", *Fuel*, vol. 158, pp. 330-350, 2015.
15. I. Obernberger, T. Brunner y G. Bänthaler, "Chemical properties of solid biofuels-significance and impact", *Biomass and Bioenergy*, vol. 30, n.º 11, pp. 973-982, 2006.
16. K. L. Kenney, W. A. Smith, G. L. Gresham y T. L. Westover, "Understanding biomass feedstock variability", *Biofuels*, vol. 4, n.º 1, pp. 111-127, 2013.
17. A. García-Maraver, D. Salvachúa, M. J. Martínez, L. F. Díaz y M. Zamorano, "Analysis of the relation between the cellulose, hemicellulose and lignin content and the thermal behavior of residual biomass from olive trees", *Waste Manag.*, vol. 33, n.º 11, pp. 2245-2249, 2013.
18. S. Wang, X. Guo, K. Wang y Z. Luo, "Influence of the interaction of components on the pyrolysis behavior of biomass", *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 91, n.º 1, pp. 183-189, 2011.
19. P. Zugenmaier, "Crystalline Cellulose and Derivatives", primera edición, Berlín, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008.
20. H. P. S. A. Khalil, M. S. Alwani y A. K. M. Omar, "Chemical composition, anatomy, lignin distribution, and cell wall structure of Malaysian plant waste fibers", *BioResources*, vol. 1, pp. 220-232, 2006.

21. C. Foelkel, "Papermaking properties of Eucalyptus trees, woods, and pulp fibers", Eucalyptus Online Book & Newsletter, pp. 1-110, 2009.
22. P. Bajpai, "Environmentally friendly production of pulp and Paper", Hoboken, NJ, Estados Unidos: John Wiley & Sons, Inc., 2010.
23. Ö. P. Çetinkol, A. M. Smith-Moritz, G. Cheng, *et al.* "Structural and chemical characterization of hardwood from tree species with applications as bioenergy feedstocks", PLOS ONE, vol. 7, n.º 12, 2012.
24. T. Provenans y W. Syafii, "Sifat kimia dan dimensi serat kayu mangium (*Acacia mangium* Willd) from three provenances", J. Trop. Wood Sci. Technol., vol. 4, n.º 1, pp. 28-32, 2006.
25. Y. Yazaki y P. J. Collins, "Wood adhesives from *Pinus radiata* bark", Holz als Roh-und Werkst., vol. 52, n.º 3, pp. 185-190, 1994.
26. Technical Association of Pulp and Paper Industry, "T207cm-99. Water solubility of wood and pulp", 1999.
27. H. Sixta, "Handbook of Pulp", vol. 1, Weinheim: Wiley-VCH, 2006.
28. R. Makino, S. Ohara y K. Hashida, "Efficient extraction of polyphenolics from the bark of tropical tree species", J. Trop. For. Sci., vol. 21, n.º 1, pp. 45-49, 2009.
29. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), "Ficha técnica *Acacia mangium*", pp. 1-3, 2005.
30. R. Moya Roque, F. Muñoz Acosta, C. Salas Garita, *et al.* "Tecnología de madera de plantaciones forestales: fichas técnicas", Revista Forestal Mesoamericana Kurú, vol. 7, pp. 18-19, 2010.
31. Instituto de Recursos Naturales Renovables (Inrenare), Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (Catie), Asociación Nacional para la Conservación de la Naturaleza (Ancon) y Asociación Nacional de Reforestadores de Panamá (Anarap), "Memorias: seminario técnico-*Acacia mangium*, comportamiento y potencial en Panamá", 1994.
32. J. F. Herrera Builes, W. A. Morales Yepes y J. D. Pérez Schile, "Selección de un método para producir carbón activado utilizando cuatro especies forestales", Rev. Fac. Nac. Agron., vol. 57, n.º 2, 2004.
33. O. S. Meneses Tirira, "Identificación de usos probables de *Pinus patula* Schlect. et Cham. con base en la determinación de las propiedades físico-mecánicas y de trabajabilidad de la madera en Iltaqui-Cotacachi-Imbabura", Universidad Técnica del Norte, 2011.

34. C. Ospina, R. Hernández, E. Restrepo, *et al.* “Guías silviculturales para el manejo de especies forestales con miras a la producción de madera en la zona andina colombiana: Pino pátula”. Serie Cartillas Divulgativas, Manizales, 2011.
35. R. Crespo Gutiérrez, E. Jiménez Romero, P. Suatunce Cunuhay, *et al.* “Análisis comparativo de las propiedades físico-mecánicas de la madera de fernán Teca (*Tectona grandis L. F.*) de Quevedo y Balzar”, *Cienc. y Tecnol.*, vol. 1, pp. 55-63, 2008.
36. C. Rivas A., “Idea de proyecto establecimiento de plantaciones forestales comerciales en los departamentos de Chinandega y Matagalpa, Nicaragua”, Nicaragua, 2004.
37. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial Colombia, “Acceso a la cadena productiva de la madera: Teca”, Universidad del Tolima.
38. M. R. Peláez-Samaniego, V. Yadama, M. García-Pérez, *et al.* “Effect of temperature during wood torrefaction on the formation of lignin liquid intermediates”, *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 109, pp. 222-233, 2014.
39. J. S. Tumuluru, S. Sokhansanj, J. R. Hess, *et al.* “A review on biomass torrefaction process and product properties for energy applications”, *Ind. Biotechnol.*, vol. 7, pp. 384-401, 2011.
40. W. H. Chen, J. Peng y X. T. Bi, “A state-of-the-art review of biomass torrefaction, densification and applications”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 44, pp. 847-866, 2015.
41. A. Uslu, A. P. Faaij y P. C. A. Bergman, “Pre-treatment technologies, and their effect on international bioenergy supply chain logistics. Techno-economic evaluation of torrefaction, fast pyrolysis and pelletisation”, *Energy*, vol. 33, pp. 1206-1223, 2008.
42. T. G. Bridgeman, J. M. Jones, I. Shield y P. T. Williams, “Torrefaction of reed canary grass, wheat straw and willow to enhance solid fuel qualities and combustion properties”, *Fuel*, vol. 87, n.º 6, pp. 844-856, 2008.
43. A. A. Khan, W. de Jong, P. J. Jansens y H. Spliethoff, “Biomass combustion in fluidized bed boilers: potential problems and remedies”, *Fuel Process. Technol.*, vol. 90, n.º 1, pp. 21-50, 2009.
44. Y. Cao, Z. Gao, J. Jin, H. Zhou, M. Cohron, *et al.* “Synthesis gas production with an adjustable H₂/CO ratio through the coal gasification process: effects of coal ranks and methane addition”, *Energy & Fuels*, vol. 22, n.º 3, pp. 1720-1730, 2008.
45. K. Im-Orb, L. Simasatitkul y A. Arpornwichanop, “Analysis of synthesis gas production with a flexible H₂/CO ratio from rice straw gasification”, *Fuel*, vol. 164, pp. 361-373, 2016.



Este libro se terminó de imprimir en
noviembre de 2019 en Panamericana Formas
e Impresos S.A. Bogotá D. C., Colombia



Otros títulos de la editorial

**La Defensa del Corredor Multimodal
de Transportes en el Valle de Aburrá
a lo largo del Río Medellín**

Rodrigo Salazar-Pineda

Hábitat y poder

Santiago Mejía Idárraga

**Transparencia y ética
de una pyme sustentable**

Jorge Alcides Quintero Quintero

Manual para la asignatura de Costos

Lizeth Yuliana Sepúlveda Atehortúa

**Conceptos básicos de Ingeniería
Económica y su aplicación
a la calculadora financiera**

Roger Ricardo

**Modelo metodológico para
la coexistencia de las señales
de TDT y LTE**

Guillermo Teuta Gómez y
Germán Darío Castellanos Tache

El libro es el resultado de la investigación: Caracterización de residuos generados en la cadena productiva del sector maderero para su aprovechamiento con número SIGP 19933 de 2015 financiado por SENNOVA: el Sistema de Investigación y desarrollo tecnológico del SENA. De esta manera el libro compila los principales resultados obtenidos en el proyecto, el cual buscaba brindar una solución a la gran disponibilidad de residuos madereros que existe en la actualidad en Colombia. Por esta razón el texto impulsa la búsqueda de sistemas de producción sostenibles que apunten a convertir los desechos de maderas en productos valiosos para diferentes sectores económicos del país, comprendiendo además las características principales que componen a diferentes especies de maderas, enfocados en tres especies maderables que predominan en la industria colombiana como son la *Tectona grandis* o Teca, el *Pinus patula* o Pino y la *Acacia mangium* o Acacia, caracterizando sus residuos e identificando sus contenidos físicos, químicos y térmicos para valorar diferentes aplicaciones que permitan generar un valor agregado a los residuos actuales, que pueden estar entre el 40-60% del total de la madera aserrada.



UNIREMINGTON
CORPORACIÓN UNIVERSITARIA REMINGTON
RES. 2661 MEN JUNIO 21 DE 1996