



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Mecánica Industrial



Universidad de Concepción  
Centro de Ciencias Ambientales EULA-Chile

**ESTUDIO TÉCNICO Y ECONÓMICO DE UN PROCESO DE COMPOSTAJE DE LOS  
RESIDUOS SÓLIDOS FRENTE A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA Y LA DISPOSICIÓN  
ACTUAL EN LA INDUSTRIA DE CELULOSA**

**Jorge Daniel Castañeda Paz**

Asesorado por la Dra. Gladys Cecilia Vidal Sáez, la Dra. Ana Augusta Passos  
Rezende y el Ing. César Augusto Akú Castillo

Guatemala, mayo de 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN



CENTRO DE CIENCIAS AMBIENTALES  
EULA-CHILE

**ESTUDIO TÉCNICO Y ECONÓMICO DE UN PROCESO DE COMPOSTAJE DE LOS  
RESIDUOS SÓLIDOS FRENTE A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA Y LA DISPOSICIÓN  
ACTUAL EN LA INDUSTRIA DE CELULOSA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**JORGE DANIEL CASTAÑEDA PAZ**

ASESORADO POR LA DRA. GLADYS CECILIA VIDAL SÁEZ, LA DRA. ANA  
AUGUSTA PASSOS REZENDE Y EL ING. CÉSAR AUGUSTO AKÚ CASTILLO  
AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO INDUSTRIAL**

GUATEMALA, MAYO DE 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Juan Carlos Molina Jiménez
VOCAL V	Br. Mario Maldonado Muralles
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

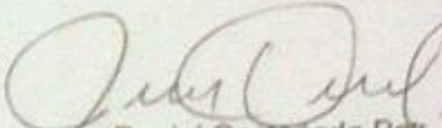
DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Alberto Eulalio Hernández García
EXAMINADORA	Inga. Aurelia Anabela Córdova Estrada
EXAMINADORA	Inga. Mayra Saadeth Arreaza
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

## HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**ESTUDIO TÉCNICO Y ECONÓMICO DE UN PROCESO DE COMPOSTAJE DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS FRENTE A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA Y LA DISPOSICIÓN ACTUAL EN LA INDUSTRIA DE CELULOSA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección del Centro EULA-Chile, de la Universidad de Concepción, en el mes de abril de 2011.

  
Jorge Daniel Castañeda Paz



## CERTIFICADO

Certifico que el señor **JORGE DANIEL CASTAÑEDA PAZ**, aprobó su Examen de Tesis "*Estudio técnico y económico de un proceso de compostaje de los residuos sólidos frente a la generación de energía y la disposición actual en la industria de celulosa*" con una nota 7 (escala de 1 al 7) durante el I semestre 2011, en la Universidad de Concepción.

Esta actividad académica se ha desarrollado en el marco del Convenio de Movilidad de Pregrado **PIMA PROMADE** entre las Universidades San Carlos, Guatemala y de Concepción, Chile.

  
  
**PROF. MIREYA ABARZUA R.**  
Coordinadora Académica  
Centro de Ciencias Ambientales EULA- Chile  
Universidad de Concepción

Concepción, septiembre 08 de 2011.

Guatemala, febrero de 2012

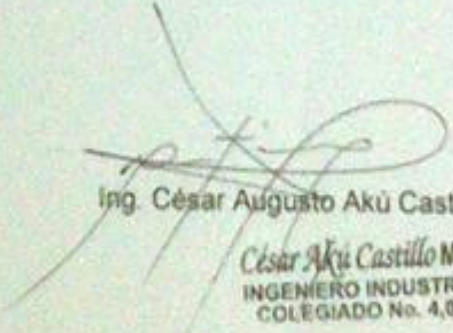
Ingeniero  
Cesar Ernesto Urquizú Rodas  
Director Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial  
Universidad de San Carlos de Guatemala  
Presente.

Estimado Ing. Urquizú:

El motivo de la presente es para informarle que estoy DE ACUERDO con el trabajo realizado por el estudiante de Ingeniería Industrial **Jorge Daniel Castañeda Paz** con No. De Carné 200714184 en el desarrollo de su Trabajo de Graduación con tema **ESTUDIO TÉCNICO Y ECONÓMICO DE UN PROCESO DE COMPOSTAJE DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS FRENTE A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA Y LA DISPOSICIÓN ACTUAL EN LA INDUSTRIA DE CELULOSA**, por lo cual APRUEBO el esquema y contenido del mismo.

Sin otro particular me despido de usted

Atentamente,



Ing. César Augusto Akú Castillo

*César Akú Castillo* MSc.  
INGENIERO INDUSTRIAL  
COLEGIADO No. 4,073

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA

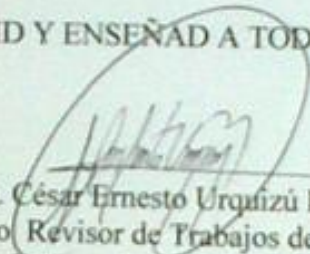


FACULTAD DE INGENIERIA

REF.REV.EML064.012

Como Catedrático Revisor del Trabajo de Graduación titulado **ESTUDIO TÉCNICO Y ECONÓMICO DE UN PROCESO DE COMPOSTAJE DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS FRENTE A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA Y LA DISPOSICIÓN ACTUAL EN LA INDUSTRIA DE CELULOSA**, presentado por el estudiante universitario **Jorge Daniel Castañeda Paz**, apruebo el presente trabajo y recomiendo la autorización del mismo.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

  
Ing. César Ernesto Urquizú Rodas  
Catedrático Revisor de Trabajos de Graduación  
Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial



Guatemala, marzo de 2012.

/mgp

Escuelas: Ingeniería Civil, Ingeniería Mecánica Industrial, Ingeniería Química, Ingeniería Mecánica Eléctrica, Escuela de Ciencias, Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS), Posgrado Maestrías en Sistemas Mención Construcción y Mención Ingeniería Vial.  
Carreras: Ingeniería Mecánica, Ingeniería Electrónica, Ingeniería en Ciencias y Sistemas, Licenciatura en Matemáticas, Licenciatura en Física.  
Centros: de Estudios Superiores de Energía y Minería (CESEM).

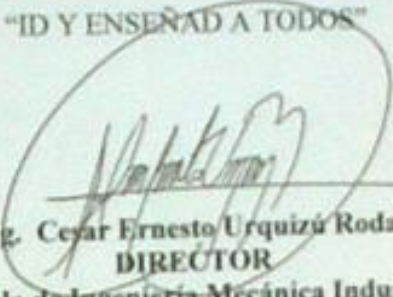
Ciudad Universitaria Zona 12, Guatemala, Centroamérica.



REF.DIR.EMI.065.012

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el Visto Bueno del Revisor y la aprobación del Área de Lingüística del trabajo de graduación titulado **ESTUDIO TÉCNICO Y ECONÓMICO DE UN PROCESO DE COMPOSTAJE DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS FRENTE A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA Y LA DISPOSICIÓN ACTUAL EN LA INDUSTRIA DE CELULOSA**, presentado por el estudiante universitario **Jorge Daniel Castañeda Paz**, aprueba el presente trabajo y solicita la autorización del mismo.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

  
Ing. Cesar Ernesto Urquiza Rodas  
DIRECTOR

Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial



Guatemala, abril de 2012.

/mgp





El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial, al trabajo de graduación titulado: **ESTUDIO TÉCNICO Y ECONÓMICO DE UN PROCESO DE COMPOSTAJE DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS FRENTE A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA Y LA DISPOSICIÓN ACTUAL EN LA INDUSTRIA DE CELULOSA**, presentado por el estudiante universitario **Jorge Daniel Castañeda Paz**, como parte de la política de Internacionalización y el Programa de Intercambio de Movilidad Académica de la Facultad de Ingeniería, con la Universidad de Concepción, Chile por tanto autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Ing. Murphy Olimpo Paiz Recinos  
Decano



Guatemala, 14 de mayo de 2012.

/gdech

# INDICE

## Índice de Contenidos

Agradecimientos.....	15
Resumen.....	17
1 Introducción.....	19
2 Hipótesis.....	23
3 Objetivos.....	23
3.1 General.....	23
3.2 Específicos.....	23
4 Antecedentes.....	25
4.1 Producción de celulosa.....	25
4.2 Proceso Kraft.....	26
4.2.1 Etapas del proceso Kraft y generación de residuos.....	28
4.2.2 Tratamiento de efluentes.....	31
4.3 Alternativas para el manejo de residuos.....	34
4.3.1 Proceso de Compostaje.....	36
4.3.2 Combustión y generación de energía.....	45
4.3.3 Utilización para materiales de construcción.....	46
4.3.4 Aplicación en el suelo.....	47
4.3.5 Otras opciones.....	48
4.4 Aspectos legales y Normativa para el compostaje.....	48
4.5 Evaluación de proyectos.....	51

4.5.1	Criterios en la evaluación de proyectos .....	51
5	Metodología.....	53
6	Resultados y Discusión.....	61
6.1	Cuantificación de residuos .....	61
6.2	Caracterización de residuos .....	62
6.3	Definición e identificación de los requerimientos técnicos de cada alternativa de destinación de los residuos.....	63
6.4	Estudio de la viabilidad económica de cada una de las alternativas.....	77
6.5	Beneficios de cada alternativa .....	90
6.5.1	Escenario E <sub>1</sub> .....	90
6.5.2	Escenario E <sub>2</sub> .....	91
6.5.3	Escenario E <sub>3</sub> .....	91
6.6	Potencial de uso y demanda de compost en la región del Bío-Bío.....	92
6.6.1	Uso agrícola.....	92
6.6.2	Uso forestal.....	94
7	Conclusiones.....	97
8	Consideraciones Finales .....	99
9	Referencias.....	101
10	Anexos.....	109

## Índice de Figuras

Figura 1. Diagrama del proceso de producción de celulosa Kraft y generación de residuos.....	27
Figura 2. Restos de corteza sucia.....	28
Figura 3. Lodo de preparación de la madera.....	29
Figura 4. Mezcla de dregs & grits.....	30
Figura 5. Flujo-grama de tratamiento de efluentes. ....	32
Figura 6. Mezcla de lodo primario y secundario.....	34
Figura 7. Priorización en el la gestión de residuos.....	35
Figura 8. Fases del proceso de compostaje aerobio.....	37
Figura 9. Sistema de compostaje por volteo. ....	40
Figura 10. Sistema de compostaje con aireación forzada. ....	41
Figura 11. Ubicación geográfica de la Celulosa Arauco y Constitución S.A. - Planta Nueva Aldea .....	53
Figura 12. Muestreo de residuos sólidos. ....	55
Figura 13. Analizador elemental FISONs EA 1108. ....	56
Figura 14. Máquina volteadora (BACKHUS) .....	64
Figura 15. Tamizadora JOKER .....	64
Figura 16. Flujo de costos Situación actual. ....	78
Figura 17. Flujo de costos escenario E <sub>1a</sub> (Sin tamizar). ....	80
Figura 18. Flujo de costos escenario E <sub>1a</sub> (Tamizado). ....	81
Figura 19. Flujo de costos escenario E <sub>1b</sub> (Sin tamizar).....	82
Figura 20. Flujo de costos escenario E <sub>1b</sub> (Tamizado).....	84
Figura 21. Flujo de costos escenario E <sub>2a</sub> .....	85
Figura 22. Flujo de costos escenario E <sub>2b</sub> .....	87
Figura 23. Flujo de costos escenario E <sub>3</sub> .....	88
Figura 24. Gráfico Costos vs. Escenario.....	88
Figura 25. Gráfico VAC vs Escenario.....	89

## Índice de Tablas

Tabla 1. Tendencia mundial para el manejo de residuos en la industria de celulosa Kraft.....	35
Tabla 2. Valores ideales para el proceso de compostaje. ....	40
Tabla 3. Alternativas de destinación de los residuos sólidos.....	48
Tabla 4. Concentración máxima de elementos traza en las materias primas. ....	50
Tabla 5. Costos de insumos (\$). ....	60
Tabla 6. Cuantificación de los residuos sólidos (m <sup>3</sup> /mes). ....	61
Tabla 7. Toneladas de residuos producidas al día.....	62
Tabla 8. Caracterización de los residuos. ....	62
Tabla 9. PCI de cada residuo. ....	63
Tabla 10. Consumo de combustible.....	65
Tabla 11. Balance de masa y energía del Escenario actual de disposición de los residuos (E <sub>0</sub> ). ....	66
Tabla 12. Cantidad necesaria de residuos del compostaje en el escenario E <sub>1a</sub> . ....	67
Tabla 13. Balance de masa y energía para el escenario E <sub>1a</sub> . ....	68
Tabla 14. Cantidad necesaria de residuos del compostaje en el escenario E <sub>1b</sub> . ....	69
Tabla 15. Balance de masa y energía para el escenario E <sub>1b</sub> . ....	70
Tabla 16. Cantidad necesaria de residuos del compostaje en el escenario E <sub>2a</sub> . ....	71
Tabla 17. Balance de masa y energía para el escenario E <sub>2a</sub> . ....	71
Tabla 18. Cantidad necesaria de residuos del compostaje en el escenario E <sub>2b</sub> . ....	72
Tabla 19. Balance de masa y energía para el escenario E <sub>2b</sub> . ....	73
Tabla 20. Balance de masa y energía para el escenario E <sub>3</sub> . ....	74
Tabla 21. Cantidades de residuos y compost y/o energía producida en cada escenario estudiado. ....	76
Tabla 22. Costos de operación mensual escenario actual E <sub>0</sub> . ....	77
Tabla 23. Costos de inversión y operación para el escenario E <sub>1a</sub> (sin tamizar). ....	79
Tabla 24. Costo de inversión y operación para el escenario E <sub>1a</sub> (tamizado). ....	80

Tabla 25. Costo de inversión y operación escenario E <sub>1b</sub> . (sin tamizar). .....	82
Tabla 26. Costos de inversión y operación del escenario E <sub>1b</sub> . (tamizado). .....	83
Tabla 27. Costo de inversión y operación del escenario E <sub>2a</sub> . .....	85
Tabla 28. Costo de inversión y operación del escenario E <sub>2b</sub> . .....	86
Tabla 29. Costo de inversión y operación escenario E <sub>3</sub> . .....	87
Tabla 30. Resumen costos de inversión y operación y VAC .....	90
Tabla 31. Número de explotaciones agropecuarias en la VIII Región. ....	93
Tabla 32. Demanda de compost para la actividad agropecuaria en la VIII Región.	94
Tabla 33. Demanda mensual de compost por provincias en la VIII Región. ....	94
Tabla 34. Número de explotaciones forestales por provincia para la VIII Región. ...	95



## **Agradecimientos**

De forma muy especial, quisiera comenzar agradeciendo a mis padres por todo el apoyo brindado y la confianza que han depositado en mi persona. A mis hermanos, Ivonne y Sergio, ya que son parte fundamental en mi vida y siempre he podido contar con ellos.

A la Universidad de San Carlos de Guatemala, por brindarme una educación con excelencia. A la Licda. Sandra Velázquez y al Ing. César Urquizú, por el apoyo brindado. A la Universidad de Concepción, en especial al Centro-EULA Chile por haberme abierto sus puertas para realizar mi proyecto de fin de carrera.

También, muy especialmente, quisiera dar las gracias a la Dra. Ana Rezende, por su paciencia, consejos, y ayuda en todo momento. A la Dra. Gladys Vidal, por enseñarme lo que es el trabajo en equipo y el crecimiento constante a nivel personal y académico. A la Dra. Claudia Ulloa y a la Mag. Rita Navarro, por ayudarme siempre. A María Cecilia y a Marianela, por su amistad y su constante apoyo durante la realización de este proyecto. A todos los compañeros del Grupo de Ingeniería y Biotecnología Ambiental (GIBA) del Centro-EULA Chile de la Universidad de Concepción.

De igual forma, agradezco enormemente a Hugo, Néstor, Erick, Guillermo, José, Erick Alejandro y Alan, por estar conmigo siempre, a lo largo de mi vida y de mi carrera universitaria.

Doy las gracias a la Tía Alicia, al Tío Juan Carlos, a Diego y a Valentina, por abrirme las puertas de su casa y por su compañía durante mi estadía en Chile.

Agradezco infinitamente a mis amigos chilenos, Paulo, Tomás, Alvaro, José, Viviana, Cristian, Samuel, Raúl, Paola, Miguel, Francisco, Jaime, Paz y Pablo ya que contribuyeron a que mi estadía en Chile fuera una de las mejores experiencias de mi vida.





## Resumen

En el proceso productivo de la celulosa Kraft se generan residuos sólidos, que generalmente son dispuestos en rellenos. Sin embargo, la excesiva generación de corteza sucia y lodo de preparación de la madera ha creado un problema ambiental y económico. Frente a esto, el compostaje se ha convertido en una alternativa de valorización de los residuos que permiten reducir el impacto ambiental, la utilización de rellenos y abrir nuevas oportunidades de mercado en la agricultura y la jardinería, entre otros. En el presente estudio se analizó el proceso de compostaje como solución al problema de la gestión de los residuos y otras alternativas como la generación de energía, para determinar un escenario que represente una solución que sea técnicamente factible y económicamente viable.

Se estudiaron aspectos técnicos y económicos de escenarios basados en el compostaje y la combustión de los residuos. Se cuantificaron las entradas y salidas de masa y energía de cada escenario propuesto. Se determinaron los costos de inversión de la maquinaria y de operación mensuales, en base a los consumos de insumos. Finalmente, se determinó el Valor Actual de Costos que permite seleccionar alternativas según el costo asociado a cada una de ellas.

De los resultados se concluye que el compostaje es una alternativa de gestión de estos residuos técnicamente factible. El lodo proveniente de la planta de tratamiento de efluentes no es adecuado para la combustión y someterlo a un proceso de compostaje tiene un impacto positivo en la generación de energía. Económicamente, el escenario más atractivo resulta del compostaje de los lodos de preparación de la madera y del tratamiento de efluentes, y la combustión de la corteza sucia tamizada, lo que generaría una cantidad de compost adecuada para una fácil gestión.

*Palabras claves: Valorización de residuos, compostaje, combustión, rellenos.*



## 1 Introducción

Las primeras técnicas para producir celulosa a partir de madera se desarrollaron a finales del siglo XIX, lo que permitió la producción de derivados de celulosa a gran escala, pero fue a partir de los años cincuenta cuando la demanda de celulosa explotó de manera significativa al aumentar el consumo mundial de papel. De esta manera la celulosa se convirtió en uno de los productos con mayor presencia en el mundo (Naciones Unidas, 2005).

Debido a que el incremento de la producción de celulosa está ligado con el aumento en el consumo de productos papeleros, se estima un crecimiento notable en la fabricación de la pulpa al pronosticarse un nivel de consumo de papel de 566 millones de toneladas en el año 2020 (Crovara, 2008). A nivel mundial, los principales productores para el año 2009 fueron Estados Unidos con un 27,16%, seguido de China con un 11,70%, Canadá con un 9,60% y Brasil con un 7,48% (BRACELPA, 2011).

Para cualquier proceso productivo, como es el caso de la producción de celulosa, el costo de la materia prima es fundamental, por lo tanto en los últimos años varios países en desarrollo como Brasil, Indonesia, Chile y Sudáfrica, que tienen ventajas naturales han aumentado considerablemente su participación en la producción y comercialización de celulosa. (Naciones Unidas, 2005).

Latinoamérica es una zona de mucha importancia para la producción de celulosa a nivel mundial, debido a los bajos costos para producir y a las excelentes condiciones para la forestación y el crecimiento de especies forestales. Del año 1990 al 2005, la producción latinoamericana de celulosa aumentó 8,1 millones de toneladas, la mayoría destinada a exportación (Crovara, 2008).

Gracias a las características climatológicas y a las excelentes condiciones del suelo, en Chile se ha logrado tener un notable crecimiento en la masa forestal del país, principalmente en el sur del mismo, siendo ésta la base de la industria de

celulosa. Son aproximadamente 2,3 millones de hectáreas de plantación forestal utilizadas para la industria forestal, incluyendo la industria de celulosa y papel. El crecimiento de esta industria se produjo hace 50 años, en el cual el pino radiata era la única base de su producción, sin embargo, debido al incremento en la demanda del papel y otros productos provenientes de la celulosa, se ha incorporado la madera de eucalipto como materia prima para la fabricación de celulosa (CMPC, 2008).

La primera planta de fabricación de celulosa se construyó a mediados del siglo XX, inversión realizada por las empresas CMPC (Compañía Manufacturera de Papeles y Cartones) y CORFO (Corporación de Fomento de la Producción) en la VIII región. Posteriormente, se fueron creando otras plantas de producción de celulosa, siendo las más importantes las plantas de Arauco y Constitución, entrando en funcionamiento en los años 1972 y 1975 respectivamente (Luraschi, 2007).

En Chile, las 2 empresas que manejan el rubro forestal son CMPC S.A., la cual produce pulpa química y mecánica y su principal planta de producción es la Santa Fe II ubicada en la localidad de Nacimiento con una producción para el año 2006-2007 de 780 mil toneladas al año, y Arauco y Constitución S.A. que produce únicamente pulpa química y su principal planta productora es el complejo de Nueva Aldea ubicada en la localidad de Nueva aldea con una producción de 856 mil toneladas al año (ATCP, 2007).

La mayor parte de celulosa producida en Chile está destinada a la exportación. En el año 2008 se produjeron 4,4 millones de toneladas, de las cuales únicamente 300 mil fueron consumidas en Chile (CMPC, 2008). A nivel mundial Chile está ubicado dentro de los primeros 5 mayores exportadores con un aporte equivalente al 2,81%. Esta industria se encuentra en el segundo lugar a nivel de importancia por detrás de la minería de cobre y molibdeno ya que representa 3,8% del total de las exportaciones chilenas; es una de las industrias más dinámicas de la

economía chilena, su producción destinada a la exportación ha aumentado 7,3 veces desde 1990, superando a los demás sectores industriales (CMPC, 2008). La producción de celulosa en Chile ha tenido un constante crecimiento debido a que presentan estándares de calidad a nivel internacional, con un crecimiento de aproximadamente 4 millones de toneladas desde el año 1990 al año 2008. (CORMA, 2009).

Sin embargo, el incremento en la producción de pulpa está ligado al constante aumento en la generación de residuos, y para la industria de celulosa Kraft, la disposición de los residuos sólidos se ha convertido en un problema económico y ambiental, por lo que identificar posibles alternativas para la valorización de los residuos sólidos se ha convertido en el foco principal dentro de la gestión de residuos.

La cantidad de residuos sólidos generados en la industria de celulosa va a depender del grado de producción, materia prima y método utilizado (Monte *et al.*, 2009). Los métodos más utilizados de destinación son la incineración y la disposición en rellenos, sin embargo, el compostaje se está convirtiendo en un método aceptable de reciclaje de subproductos orgánicos, reduciendo el impacto ambiental. Según Marche *et al.* (2003), el proceso del compostaje permite la reducción de los rellenos y la limitación de las emisiones de gases de efecto invernadero.

En la Celulosa Arauco y Constitución-Planta Nueva Aldea, la disposición en rellenos es la principal herramienta para la destinación de los residuos sólidos, pero la producción de celulosa se ha incrementado como la generación de residuos y surge la necesidad de otra alternativa para su gestión. El compostaje de dichos recursos puede ser un camino favorable de tratamiento y disposición. Sin embargo, es necesario evaluar el proceso de compostaje frente a otras alternativas.



## **2 Hipótesis**

La valorización de los residuos sólidos provenientes de la industria de celulosa a través de un proceso de compostaje resulta técnica y económicamente factible y más viable ambientalmente que la generación de energía y la disposición en rellenos.

## **3 Objetivos**

### **3.1 General**

Evaluar aspectos técnicos y económicos de un proceso de compostaje de los residuos sólidos como estrategia de valorización frente a la generación de energía y la disposición actual de la industria celulosa.

### **3.2 Específicos**

3.2.1 Caracterizar y cuantificar los residuos sólidos provenientes del proceso de pulpa Kraft en la industria de celulosa.

3.2.2 Identificar los requerimientos técnicos del compostaje y la combustión como alternativas de destinación de los residuos.

3.2.3 Analizar la viabilidad económica de cada una de las alternativas.





## **4 Antecedentes**

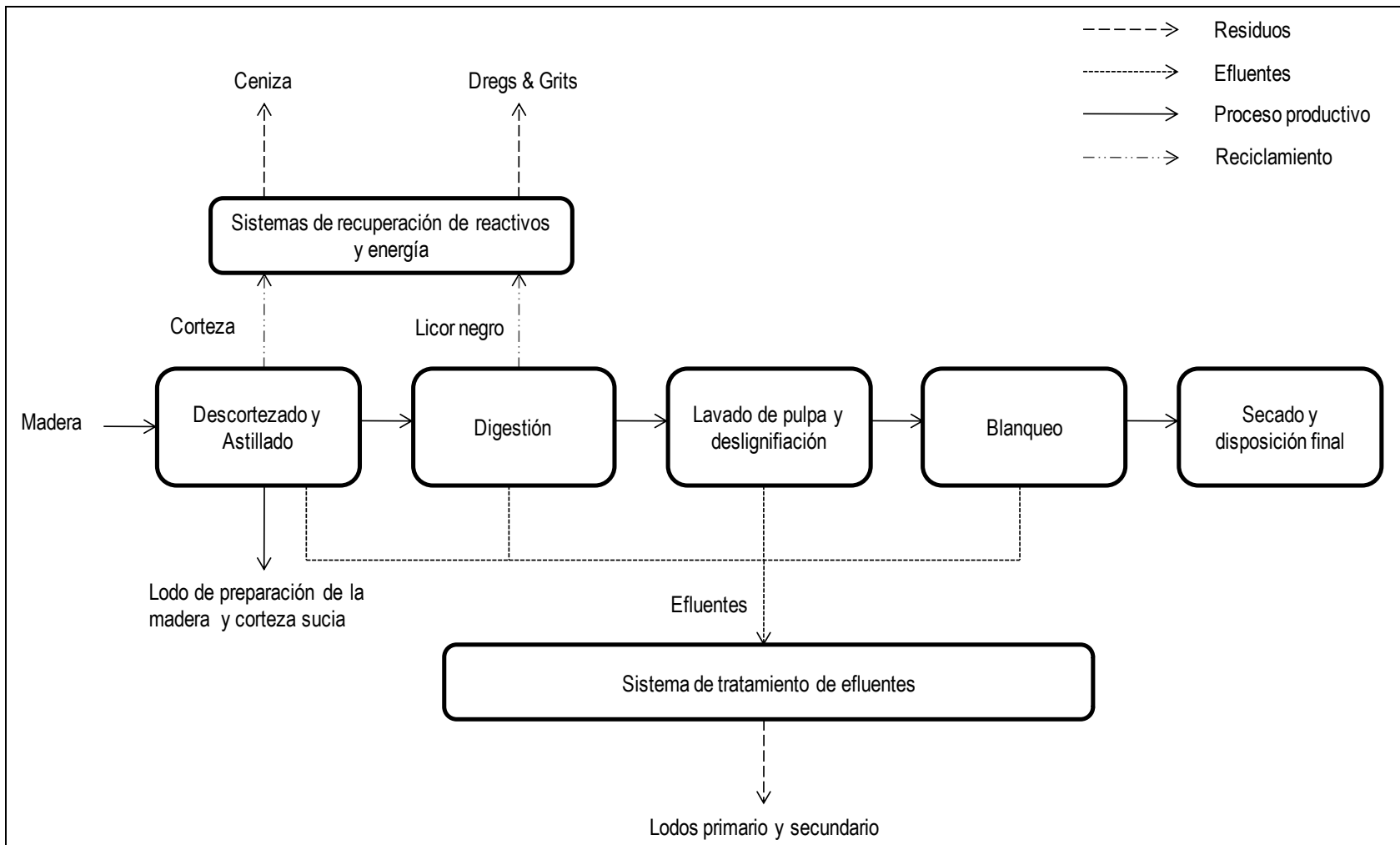
### **4.1 Producción de celulosa**

La celulosa es un componente que se encuentran en las paredes celulares de las fibras de los árboles y otras plantas, éste contenido varía de acuerdo al tipo de árbol o planta. Los árboles de pino y eucalipto son las principales fuentes de materia prima para la producción de celulosa, éstos representan el 98% del volumen producido. Además, la celulosa se puede obtener de otro tipo de plantas como el bambú o de residuos agrícolas. Después del cultivo, la madera es descascarada y picada en pequeños pedazos para después ser sometidos a procesos mecánicos o químicos para la producción de la celulosa (CMPC, 2008).

Desde el punto de vista técnico y comercial, la celulosa recibe diferentes denominaciones dependiendo del proceso que se utilice para separar las fibras de celulosa del resto de los componentes de la madera: la celulosa química, que se obtiene a partir de un proceso de cocción de las partículas de madera (astillas) con diferentes productos químicos a altas temperaturas y presiones y la pulpa mecánica que es una mezcla de celulosa y lignina, que se obtiene desfibrando la madera a altas temperaturas y presiones. Entre ambas categorías está también la celulosa denominada quimo-termo-mecánica, donde se utiliza una combinación de los procesos anteriores. La celulosa resultante de estos procesos tiene la forma de una pasta (debido a un alto contenido de agua) y tiene aún contenido importante de lignina, que le da una tonalidad café, similar al color natural de la madera (CMPC, 2008).

## **4.2 Proceso Kraft**

El proceso Kraft es el más utilizado para la elaboración de celulosa y es un proceso químico en el cual los troncos son descortezados y chipiados para convertirlas en astillas que son cocidas para la extracción de la lignina, ésta cocción se realiza con una solución alcalina basada en sulfuro de sodio y soda cáustica. La producción de pulpa a través del proceso Kraft puede ser dividida en 5 fases: preparación de la madera, digestión, lavado de pulpa y deslignificación, blanqueo de pulpa y secado y disposición final (Davis, 2000; Nurmesniemi et al, 2006). En la Figura 1 se muestra el proceso general de producción de la pulpa Kraft y la generación de residuos.



**Figura 1.** Diagrama del proceso de producción de celulosa Kraft y generación de residuos (adaptado de Xavier, 2006; Arauco, 2007).

#### 4.2.1 Etapas del proceso Kraft y generación de residuos

- i. Descortezado y astillado: Es la etapa en la cual la madera es descortezada y astillada previamente a su ingreso a los digestores. Los residuos generados son la corteza limpia (que es trasladada a una caldera de biomasa para la generación de energía obteniendo ceniza como residuo final), la corteza sucia (Figura 2) denominada así por incluir impurezas groseras como piedras y metales y el lodo de preparación de la madera, mostrada en la Figura 3 (Arauco, 2007).



**Figura 2.** Restos de corteza sucia



**Figura 3.** Lodo de preparación de la madera

- ii. Digestión: Los chips de madera son cocidas a altas temperaturas (170– 182 °C) y presiones entre 690 y 930 kPa. con una solución sulfuro de sodio y soda cáustica, también llamado licor blanco (Davis, 2000). La digestión se utiliza para separar la lignina de la celulosa y se obtiene una pulpa café debido a la aún existente presencia de lignina. De este proceso se obtiene lo que se conoce como licor negro el cual es llevado a la caldera de recuperación y se utiliza como energía de combustión que genera vapor utilizado en la producción de energía eléctrica, y en la cual se obtiene un licor verde como residuo que es filtrado para eliminar cualquier sólido suspendido, generando un residuo denominado dregs (Arauco, 2007).

Los dregs son impurezas no solubles generados del carbón no quemado en el proceso de clarificación del licor verde, estos residuos son livianos y están compuestos principalmente por calcio, carbono, hierro, sílice, alúmina, magnesio y algunos sulfuros (Zambrano *et al.*, 2005).

El licor verde se recupera después de la combustión siendo trasladado a un proceso de caustificación en el cual se le agrega cal para obtener el licor blanco utilizado en el proceso de cocción. De la etapa de caustificación se obtienen como residuos los grits (Arauco, 2007). Los grits, debido a que son

sólidos generados en el proceso de caustificación, están constituidos por CaO y elementos como hidróxido sódico y sulfuros (Zambrano *et al.*, 2005).

Los dregs y los grits (Figura 4) se caracterizan por ser lodos inorgánicos separados del ciclo químico de recuperación. Estos lodos son, generalmente depositados en vertederos, posteriormente de su deshidratación (Monte *et al.*, 2009).



**Figura 4.** Mezcla de dregs & grits

- iii. Lavado y deslignificación: En esta etapa la pulpa café obtenida durante el proceso de digestión es lavada con agua, dónde se obtiene como residuo agua y lignina. El principal objetivo del lavado es remover aquellos materiales indeseables de la pulpa que pueden afectar el proceso de blanqueo (Davis, 2000). Posteriormente es deslignificada con oxígeno para desprender la mayor cantidad posible de lignina antes del proceso de

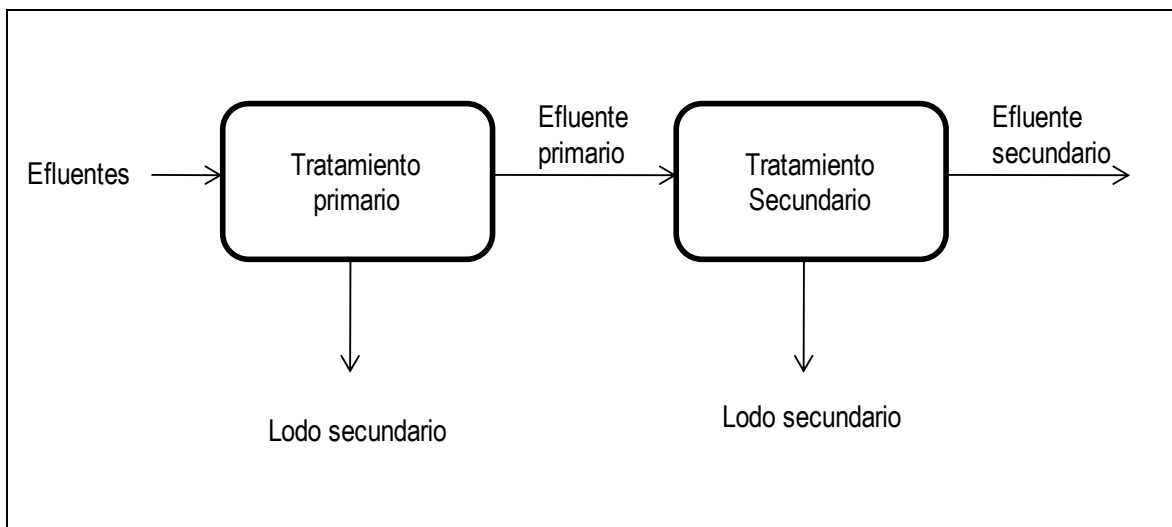
blanqueo, la pulpa resultante tiene todavía una tonalidad café debido a la presencia de cierta cantidad de lignina (Arauco, 2007)

- iv. Blanqueo: La pulpa obtenida del proceso de deslignificación es trasladada a la etapa de blanqueo, en la cual se le retira por completo la lignina impregnada, esto se realiza en base a sustancias químicas y agua, la pulpa resultante es de color blanco y se obtienen como residuos agua y químicos utilizados (Arauco, 2007).
- v. Secado y disposición final: La pulpa blanqueada ingrese al sistema de secado donde se le inyecta vapor y se obtienen como residuos agua y despuntes debido al acondicionamiento que se le da al producto final (Arauco, 2007).

#### *4.2.2 Tratamiento de efluentes*

Los residuos líquidos (efluentes) provenientes del proceso de producción de celulosa deben de ser tratados con el objeto de minimizar el impacto negativo en el medio ambiente, esto se realiza mediante el tratamiento de efluentes. Estos residuos son generados principalmente del proceso de blanqueo y secado de pulpa, del lavado de equipos y derrames de pulpa. Se generan entre 30 m<sup>3</sup> y 90 m<sup>3</sup> de residuos líquidos por tonelada de pulpa que contienen sólidos suspendidos, material orgánico disuelto, reactivos de blanqueo y otros (Zaror, 2002). El tipo de tratamiento más utilizado es el de lodos activos y consta principalmente de un tratamiento primario y un tratamiento secundario (Figura 5).





**Figura 5.** Flujo-grama de tratamiento de efluentes.

#### 4.2.2.1 *Tratamiento primario*

El tratamiento primario es la etapa que tiene por objetivo la eliminación de sólidos en suspensión y materiales flotantes, impuesta por los límites, tanto de descarga al medio receptor como para poder llevar los efluentes a un tratamiento secundario, esta operación es realizada en decantadores o clarificadores primarios donde se genera el denominado lodo primario (Ramalho, 1996).

El lodo primario se compone principalmente de fibras y cargas perdidas a causa de una incompleta separación sólido líquido en las distintas etapas de la producción de la pulpa. La pérdida de materiales varían del 3% y 4% que son capturados por la gravedad establecida en el clarificador primario (Mahmood & Elliot, 2006). El lodo está formado por fibras de madera en un 70%, donde un pequeño contenido de este total está asociado con la lignina insoluble, 5% de arena y 25% de carbonato de calcio precipitado (Modolo *et al.*, 2011).

El tratamiento primario incluye normalmente, además de la eliminación de sólidos y material no disuelto, la neutralización de pH, estabilización de flujo y estabilización térmica (Zaror, 1998).

#### 4.2.2.2 *Tratamiento secundario*

El tratamiento secundario comprende tratamientos biológicos que pueden ser de carácter aeróbico o anaeróbico (Ramalho, 1996). Con este proceso se busca reducir el contenido orgánico del efluente, esto se lleva a cabo con el aumento de microorganismos encargados de la descomposición de la materia orgánica (Masters, 1998). En los sistemas de tratamiento secundario, los contaminantes orgánicos son degradados por organismos que los transforman en compuestos más sencillos y de fácil eliminación (Zaror, 1998).

Del tratamiento secundario se genera el denominado lodo secundario, el cual es un residuo biológico proveniente del clarificador secundario de la planta de tratamiento de efluentes (Monte *et al.*, 2009). El lodo se trata de una suspensión líquida que contiene aproximadamente 2% de sólidos en peso, y se compone de compuestos orgánicos biodegradables, así como de metales pesados. El lodo secundario también es considerado una biomasa de residuos con energía almacenada que puede ser potencialmente recuperada a través de diversos procesos biológicos y termoquímicos. Al igual que otros tipos de biomasa, el lodo secundario es una fuente de energía renovable que afectan poco o de ninguna manera al efecto invernadero (Zhang *et al.*, 2010).

En la Figura 6 se muestra la mezcla del lodo primario y el lodo secundario.



**Figura 6.** Mezcla de lodo primario y secundario

#### **4.3 Alternativas para el manejo de residuos**

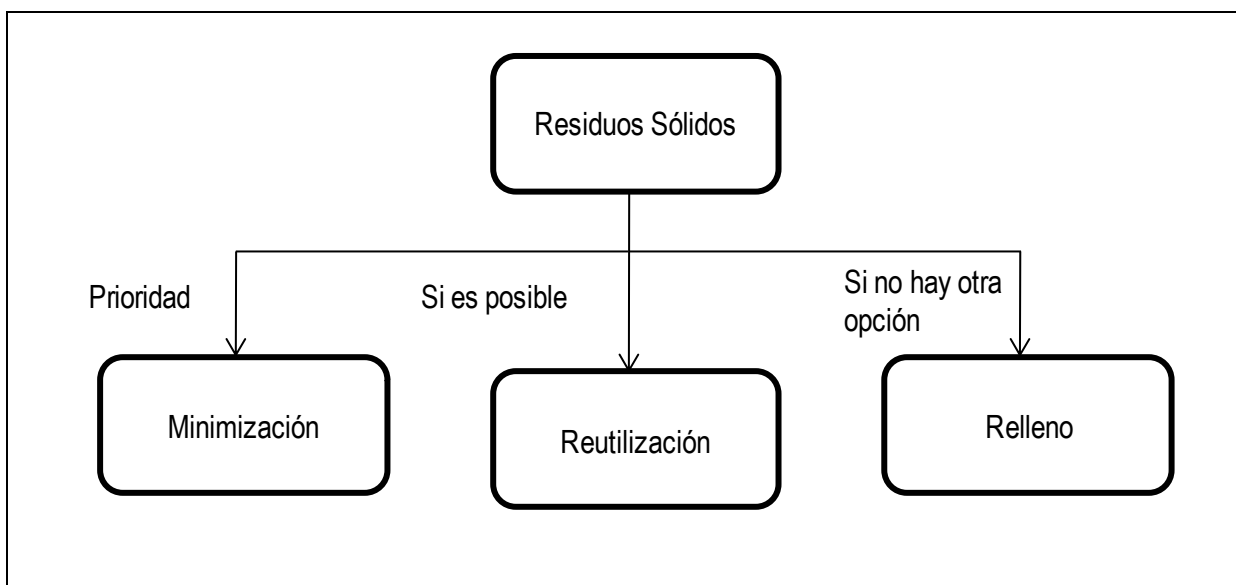
Los residuos sólidos generados por la industria de celulosa Kraft han tenido la tendencia de ser dispuestos en rellenos o vertederos. Sin embargo, desde el punto de vista ambiental, esto es un problema que necesita solución con otras alternativas para el manejo de residuos. (Oral *et al.*, 2005). En la Tabla 1 se muestra la tendencia mundial en el manejo de residuos.

**Tabla 1.** Tendencia mundial para el manejo de residuos en la industria de celulosa Kraft.

Origen	Generación de residuos (ton/año)	Alternativa de gestión
Portugal	35.000	Vertedero
U.S.A.	3,6 – 3,9 millones (residuo inorgánico) 12 millones (residuo orgánico)	Vertedero (70%) Incineración (21%) Uso agrícola (8%)
Australia	450.000	Vertedero
Canadá	1,7 millones	Vertedero
Finlandia	450.000	Vertedero
Reino Unido	600.000	Vertedero

Fuente: Zambrano *et al.*, 2006.

La minimización de los residuos sólidos generados se presenta como la mejor alternativa para la gestión de los residuos, seguido de la recuperación de los mismos (Nurmesniemi *et al.*, 2006). En la Figura 7 se muestra la priorización en la gestión de residuos sólidos.



**Figura 7.** Priorización en la gestión de residuos (Modificado de Monte *et al.*, 2009).

La reutilización de residuos es importante desde diferentes puntos de vista: ayuda a salvar y sostener los recursos naturales y disminuye la contaminación del ambiente. El uso de residuos representa un camino para resolver algunos problemas para su destino final (Modolo *et al.*, 2010).

Los residuos sólidos ocasionados por la industria de celulosa son administrados en términos de eliminación de residuos y existen diferentes opciones para su reutilización, dentro de los cuales se tienen: vertederos, incineración, compostaje, reciclado en plantas de cemento o cerámica, áridos ligeros, el asfalto, la agricultura, aplicación en el suelo, utilización para materiales de construcción y otros. Sin embargo, es evidente que el uso final de los residuos depende de sus características físico – químicas y microbiológicas (Monte *et al.*, 2009; Modolo *et al.*, 2011).

A continuación se explican las posibles alternativas de destinación de los residuos sólidos provenientes de la industria de celulosa Kraft:

#### *4.3.1 Proceso de Compostaje*

El compostaje es un proceso de tipo físico, químico y microbiológico basado en la transformación de la materia orgánica contenida en los residuos sólidos, gracias a la acción de microorganismos que trabajan en condiciones aeróbicas mesotérmicas entre 10°C y 40°C y termogénicas entre 40°C y 75°C para asegurar la pasteurización del producto (INN, 2004).

El proceso de compostaje depende de la acción de microorganismos que requieren de una fuente de carbono que les proporcione energía y material para nuevas células, junto a un suministro de nitrógeno para proteínas celulares. El nitrógeno es el nutriente más importante y en general si en la materia orgánica hay suficiente nitrógeno, los otros nutrientes requeridos también estarán disponibles en

el rango adecuado. Es deseable una relación carbono-nitrógeno (C/N) que oscile en un rango de 25 a 35/1 en la mezcla inicial. El contenido óptimo de humedad del material para compostar es de un 50 – 60% (Dalzell *et al.*, 1991).

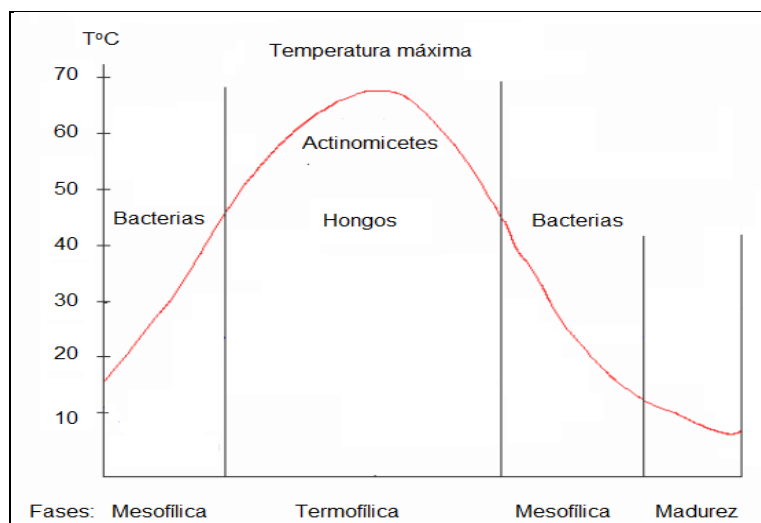
El proceso de compostaje se puede realizar mediante dos métodos o sistemas:

*i. Compostaje en pilas o sistemas abiertos (Aerobio)*

Este compostaje es caracterizado principalmente por el predominio de los metabolismos respiratorios y por la existencia de etapas mesotérmicas (10-40 °C) y etapas termogénicas (40-75 °C), además de la participación de microorganismos mesófilos y termófilos respectivamente (OPS, 1999).

Este método consiste en juntar la mezcla en pilas largas y estrechas para su aireación. Los sistemas abiertos de compostaje suelen ser de bajo y costo y tecnología sencilla (Moreno & Moral, 2008).

Las etapas del proceso de compostaje, de acuerdo al comportamiento de la temperatura se muestran en la Figura 8.



**Figura 8.** Fases del proceso de compostaje aerobio (Varela & Basil, 2011)

La Fase I o fase mesotérmica es la fase inicial y dura alrededor de 1 a 7 días, en esta etapa se inicia la actividad de degradación realizada por hongos y bacterias mesofílicas sobre la materia orgánica de fácil degradación (INTEC, 1999).

La Fase II o fase termofílica es la etapa en la que actúan los microorganismos termofílicos a temperaturas entre 40 y 65°C y el pH sube a más de 8 y empieza a estabilizarse. Cuando la temperatura, que ha seguido aumentando, sobrepasa los 60°C, los hongos mueren y el proceso es protagonizado por bacterias y actinomicetos. En ningún caso se debería dejar que la temperatura suba a más de 70°C. A partir de este punto, la temperatura empieza a bajar para dar paso a la tercera etapa del proceso, la fase III o de enfriamiento. Si la compactación y ventilación del sistema son adecuadas, durante esta fase se producen visibles emanaciones de vapor de agua. El CO<sub>2</sub> se produce en volúmenes importantes que difunden desde el núcleo a la parte superficial. Este gas juega un papel fundamental en el control de larvas de insectos. Esta etapa es fundamental para la higienización del material. (OPS, 1999; INTEC, 1999)

Con la desaparición de los nutrientes y de los organismos termofílicos, comienza el descenso en la temperatura y da lugar a la Fase III o fase de enfriamiento, durante esta etapa la temperatura baja a un ritmo más o menos similar a cuando aumentaba, y el pH se sigue estabilizando mientras se reduce muy ligeramente. Una vez que la temperatura baja de 60 °C, inicia una recolonización de hongos que se unen al proceso y que serán utilizadas como nutrientes los materiales más resistentes a la biodegradación (OPS, 1999).

La etapa de maduración es la última etapa del proceso de compostaje, y es en la cual la temperatura y el pH acaban de estabilizarse. Diversos organismos animales se incorporan al proceso, y se da la formación de ácidos húmicos y fúlvicos. Al final, los materiales llegan a un estado de descomposición que tal que es casi imposible determinar su origen, y ya está listo el abono orgánico tipo compost. Desde el punto de vista microbiológico, la finalización del proceso de

compostaje se tipifica por la ausencia de actividad metabólica. Las poblaciones microbianas se presentan en fase de muerte debido al agotamiento de los nutrientes (OPS, 1999).

La aireación realizada durante el proceso de compostaje aerobio se puede realizar mediante los siguientes sistemas:

*a) Proceso de volteo*

El sistema de compostaje por volteo es el sistema más conocido, utilizado y económico que existe, en el cual los materiales se amontonan en el suelo o pavimento, sin comprimirlos demasiado. La forma y tamaño de la pila son vitales para el proceso del compostaje, las medidas óptimas son: rango de 1 – 2 metros de altura y un rango de 2 – 4 metros de ancho, la longitud es variable, generalmente tiene forma trapezoidal. El tamaño y la forma de la pila están diseñados para que permita la circulación del aire. El tamaño óptimo varía de acuerdo al tipo de material y temperatura ambiente. Una vez lista la pila la única gestión necesaria es el mezclado o volteo de la pila con una máquina adecuada. La frecuencia del volteo depende de varios factores como la humedad, material y rapidez con el que se desea realizar el proceso, lo habitual es que se realice un volteo cada 6 – 10 días. El volteo o mezclado se realiza con el fin de homogenizar la mezcla y la temperatura con el objetivo de mejorar la ventilación, eliminar el excesivo calor y controlar la humedad. La duración de este proceso es de aproximadamente 2 o 3 meses más el período de maduración (1 mes) del compost (Emison, 2011). En la Figura 9 se muestra un sistema de compostaje abierto con aireación por volteo.





**Figura 9.** Sistema de compostaje por volteo.

Guerrero & Monsalve (2006), establecen los parámetros mostrados en la Tabla 2 para el proceso de compostaje en un sistema abierto por volteo:

**Tabla 2.** Valores ideales para el proceso de compostaje.

Parámetro	Rango aceptado	Condición óptima
(C/N)	20/1-40/1	25/1-30/1
Humedad	40-65%	50-60%
Temperatura	55-75	65-70
Aireación	c/semana	según temperatura y humedad
pH	5.5-9	6.5-8
Partícula	0.3-5cm	0-5-1cm
Tamaño de pila	0.8-1m	0.8m

Fuente: Guerrero & Monsalve (2006).

*b) Aireación Forzada*

El proceso de compostaje mediante aireación forzada es un sistema de pilas estáticas ventiladas en el cual el material se coloca sobre un sistema de tubos perforados conectados a un sistema que inyecta o aspira aire a través de la pila. Cuando la pila llegue a la temperatura límite, unos sensores activan el sistema de

aireación enfriando la pila con oxígeno. De acuerdo con Emison (2011), este proceso dura entre 4 y 8 semanas para luego apilar el producto durante 1 o 2 meses para su maduración. El movimiento del aire suele ser más eficiente cuando se emplea la presión negativa, ya que la presión perdida es favorable para el proceso, sin embargo favorece la obtubación de los conductos de aireación (Moreno & Moral, 2008). En la Figura 10 se muestra un sistema de compostaje abierto con aireación forzada.



**Figura 10.** Sistema de compostaje con aireación forzada.

*ii. Compostaje en reactores o sistemas cerrados*

Este tipo de compostaje se realiza en el interior de recipientes cerrados que pueden tener diversos diseños. Se conocen 2 tipos de sistemas: flujo pistón y tanque agitado, en ambos casos se necesita de la inyección del aire para favorecer el proceso (Hermosilla, 2005).

Los distintos tipos de residuos se alimentan a la máquina y luego se dosifica una cantidad programada de material rico en carbono (aserrín, paja) para asegurar el proceso de descomposición. Luego, la mezcla es desmenuzada dentro de la máquina para asegurar un tamaño de partícula adecuado. Una vez realizado el proceso de trituración y mezcla, el material pasa a un contenedor de compostaje

provisto de una bomba para inyectar aire a la mezcla, lo que facilita el trabajo de los microorganismos que convierten los desechos en compost (INTEC, 1999).

#### *4.3.1.1 Compost*

El compost es un producto constituido por el material orgánico resultante del proceso de compostaje (INN, 2004). Se puede decir que el compost es un producto mejorador del suelo que se puede usar en las siguientes actividades: agricultura, selvicultura, reforestación, mantenimiento de parques y jardines y otros. (Hermosilla, 2005).

Algunos beneficios resultantes de la aplicación de compost son: mejoramiento de las propiedades físico-químicas de los suelos, aumento de materia orgánica y nutrimentos para las plantas, mejora de algunas propiedades de fertilidad de las capas más profundas, reduce la efectividad de la concentración de los pesticidas en el suelo mediante la formación de enlaces de sus moléculas con las moléculas orgánicas. Así, la incorporación de compost en el suelo utilizado para actividades agrícolas permitirá retener nutrimentos, sincronizándose la liberación de los mismos con las necesidades de extracción de las plantas y disminuyendo las pérdidas por lixiviación (Mora, 2006). Sin embargo, la aplicación agrícola del compost debe de ser establecida según las necesidades de los suelos y cultivos y el objetivo principal ha de ser el de mantener la fertilidad y conseguir una producción agrícola de calidad (Soliva & Paulet, 2001; Rodríguez & Córdova, 2006; INIA, 2008).

Además de presentar importantes beneficios como mejorador de suelos y ser una alternativa viable para la gestión de los residuos sólidos. Para la elaboración del compost se pueden utilizar cualquiera de las siguientes sustancias: de origen vegetal (restos de poda, corteza, etc.), de origen animal (residuos de matadero, actividad agrícola, etc.), de origen industrial (lodos, fangos y otros). Todas las

sustancias mencionadas tienen que estar constituidas por materia orgánica biodegradable (Bureau Veritas Formación, 2008).

El compost presenta una característica muy atractiva y es que existe un mercado para el producto (Varela & Basil, 2011). Entre los potenciales compradores de compost se encuentran los agricultores, que practican agricultura ecológica u horticultura, fruticultores, propietarios de viveros, además de ser aplicables en ciertas áreas forestales en las cuales el suelo se encuentre degradado. El precio de compost varía según las características de las materias primas y de la calidad del producto final. El precio depende igualmente del precio del mercado (Varela & Basil, 2011).

#### *4.3.1.2 Compostaje de residuos de la industria de celulosa*

Los residuos sólidos provenientes del proceso de celulosa contienen fibras y materiales orgánicos que pueden estabilizarse a través del compostaje. En algunas ocasiones se añaden otros residuos con el fin de aumentar el contenido de nutrientes. El compostaje de los residuos orgánicos de la celulosa es de las alternativas que requiere de un menor costo, con el único requisito de disponer de tierras grandes para el proceso (Monte *et al.*, 2009).

De acuerdo con Zambrano *et al.* (2010), el compostaje es una alternativa más sustentable que la disposición en vertederos como alternativa de disposición de los residuos sólidos de la industria de celulosa y que el producto final es adecuado como mejorador de suelos o abono debido a que el contenido orgánico en los lodos puede tener efectos potencialmente beneficiosos para los suelos. Sus estudios indican que el compostaje del lodo secundario proveniente de la planta de tratamiento de efluentes y los dregs resulta factible con una moderada cantidad de dregs (5-8%), obteniendo un compost de alta calidad.

El compost que incluye sólidos provenientes de la planta de celulosa tiene un fuerte efecto, principalmente en la parte nutricional, contribuyendo al crecimiento de tomates, estudio realizado por Levy *et al.* (2003).

Tucker *et al.* (2005) señalan que los lodos provenientes de la industria de celulosa han sido compostados de manera efectiva, utilizando como tecnología para el proceso hilera y pilas aireadas. El compostaje de los lodos podría abrir nuevas oportunidades de mercado, por ejemplo, en actividades agrícolas y en jardinería. Análisis realizados indican que la estabilización (compostaje) de los lodos provenientes de la industria de celulosa proporciona un producto con buenas propiedades para la mejora estructural del suelo. El compostaje también puede ser muy eficaz para matar los microorganismos patógenos presentes en las materias primas.

Marche *et al.* (2003) estudiaron el compostaje con una mezcla de lodo primario y secundario provenientes de la planta de tratamiento de efluentes en proporciones iguales y aserrín, con un porcentaje de carbono en la mezcla inicial de 45% y un porcentaje de nitrógeno de 2,3%, el cual el compostaje tuvo una reducción en su masa de 50% y su relación C/N se redujo un 12% en relación a la mezcla inicial.

Según Yamada *et al.* (2006), el compostaje aeróbico es uno de los tratamientos más utilizados para los lodos activados o secundarios, siendo un proceso barato, simple y ambientalmente amigable para la disposición de los residuos sólidos. Por lo tanto, las técnicas de compostaje han recibido un creciente interés y se han desarrollado para el tratamiento de lodos activados.

Otros beneficios del compostaje de los residuos provenientes de la industria de celulosa son: la retención de nutrientes y su disponibilidad, el mejoramiento en las características de manejo, la reducción de masa, contenido de humedad y volumen, la eliminación de posibles molestias, mejora del almacenamiento y proporciona una balanceada base de nutrientes para diversas aplicaciones. Las reducciones en la masa, humedad y volumen previamente mencionadas permiten

una mejora tanto en el transporte como en el almacenamiento de los lodos (Tucker *et al.*, 2005).

#### 4.3.2 *Combustión y generación de energía*

La combustión es un conjunto de reacciones de oxidación con desprendimiento de calor que se producen entre dos elementos: el combustible, que puede ser un sólido (el cartón, la madera y otros), un líquido (gasolina, Fuel-Oil, etc.) o un gas y el comburente, oxígeno. A diferencia de otros procesos de oxidación lenta, la combustión es un proceso de oxidación rápida debido a la existencia de una llama estable (García, 2001).

Para la generación de energía, se aprovecha el calor obtenido durante el proceso de combustión, por lo que el poder calórico de cada material que va a ser incinerado, es fundamental para el análisis de este proceso. Se define como poder calórico al a cantidad de calor que se obtiene de una unidad de masa (kg, t, lb) de un combustible. Existen 2 tipos de poder calórico para un material combustible, el poder calórico superior (PCS) y el poder calórico inferior (PCI). El poder calórico inferior es aquel que incluye el calor necesario para evaporar el agua contenida en el material, mientras que el poder calórico que no incluye el calor necesario para la evaporación del agua, por lo que el PCI es el que nos indica el calor disponible resultante de la oxidación del combustible. El calor utilizado para la evaporación del agua es un calor que no se puede aprovechar para la generación de energía, debido a esto, el poder calórico normalmente utilizado, es el poder calórico inferior (García, 2001).

La incineración de residuos, combinado es con un sistema de generación de energía es uno de los métodos más utilizados para la disposición de residuos en Europa para la destinación de los residuos sólidos provenientes de la industria de celulosa. Esta técnica se puede aplicar para casi todos los tipos de lodos,

incluyendo el lodo biológico o secundario. Sin embargo, por lo cantidad de ceniza y humedad presente puede que este proceso sea deficiente para la generación de energía. El principal logro de la incineración es la reducción de cantidad de residuos dispuestos en vertederos en un 80-90% (Monte *et al.*, 2009).

Según Hagelqvist (2009), la recuperación de la energía mediante un proceso térmico puede ser más eficiente si se utiliza una deshidratación previa, sin embargo, existen limitaciones con un secado mecánico ya que aún existe un 50-70% de humedad en el lodo, por lo que una deshidratación química puede mejorar los límites de calidad de la recuperación de energía.

De acuerdo con Stoica *et al.* (2009), en Suecia, la deshidratación mecánica y la incineración con disposición de cenizas en vertedero de los lodos provenientes de la planta de tratamiento de efluentes, es una estrategia dominante para el manejo de los residuos sólidos. El principal inconveniente de la incineración con una deshidratación mecánica previa es el bajo valor calórico neto (2.6 MJ/kg) en los lodos debido a la cantidad de agua presente.

#### *4.3.3 Utilización para materiales de construcción*

Los residuos de la celulosa pueden ser recuperados y utilizados por la industria del cemento. Para esta industria el lodo primario o la mezcla de los lodos provenientes de la planta de tratamiento de efluentes pueden ser reutilizados sin ningún inconveniente. Aunque el nivel de esta revalorización depende de la cantidad y características de los componentes inorgánicos presentes en el residuo. El lodo, que contiene alrededor de un 50% de humedad, se seca con un pre-secador en el horno del cemento, por lo que no se necesita la utilización de energía extra para reducir la humedad a un 10-15%. Para la producción del cemento es útil el alto poder calorífico de los compuestos orgánicos con alto contenido de carbono y las cenizas resultantes permanecen en el producto. Este

tipo de gestión de residuos es viable cuando ambas industrias se encuentran ubicadas en el mismo sector y si la industria cementera tiene la capacidad de usar los lodos en su proceso (Monte *et al.*, 2009).

Según Modolo *et al.* (2011), la utilización del lodo primario proveniente de la planta de tratamiento de efluentes en materiales de construcción es una solución sostenible para la valorización de los residuos. Los estudios realizados indican que se puede aprovechar la naturaleza fibrosa del lodo para la incorporación en materiales de construcción sin tener impacto en la producción final de fibra de cemento. Esta valorización no solo presenta beneficio económico para la fábrica de cemento, sino que también evita el vertido de residuos para la empresa de pulpa.

#### *4.3.4 Aplicación en el suelo*

Monte *et al.* (2009), señalan que debido a su contenido de  $\text{CaCO}_3$ , la aplicación en el suelo ha sido un método utilizado para la destinación de los residuos sólidos generados por el proceso Kraft en zonas que cuentan principalmente con suelo ácido. Antes de uso en el suelo, los lodos son deshidratados o incinerados con el objetivo de reducir su volumen. Su aplicación consiste en el transporte de los lodos desde la fábrica de pulpa hacia los campos y su propagación en la tierra en una capa delgada.

Estudios realizados por Zambrano *et al.* (2005), señalan que la utilización de los dregs y los grits provenientes del proceso de recuperación del licor blanco en la industria Kraft, es útil gracias a sus características alcalinas, por lo que se puede utilizar para mejorar la calidad de los suelos ácidos. Debido a sus propiedades alcalinas, la aplicación de los dregs y los grits eleva el pH y favorece la disponibilidad de nutrientes.



#### 4.3.5 Otras opciones

Otras opciones que han sido usadas para la destinación son: uso de los lodos secados como arena para gatos, como absorbente, como plaguicida-fertilizante, se realiza la conversión de los componentes de los lodos a combustibles y una bioconversión de la fracción celulósica de los lodos a etano (Monte *et al.*, 2009).

En la Tabla 3 se muestran en forma resumida las posibles alternativas para la destinación de los residuos según sus características.

**Tabla 3.** Alternativas de destinación de los residuos sólidos.

Alternativa de destinación	Residuo
Incineración	Lodo primario y secundario Corteza limpia (Energía)
Compostaje	Corteza sucia Lodo de preparación de la madera Lodo primario y secundario
Utilización en materiales de construcción	Lodo primario
Aplicación en el suelo	Dregs y grits

Fuente: Monte *et al.*, 2009; Levy *et al.*, 2003; Zambrano *et al.*, 2010; Tucker *et al.*, 2005; Marche *et al.*, 2003; Yamada *et al.*, 2006; Modolo *et al.*, 2011; Stoica *et al.*, 2011.

#### 4.4 Aspectos legales y normativa para el compostaje

En la actualidad, existe un creciente interés en el desarrollo del proceso de compostaje como una alternativa a la gestión de residuos orgánicos (restos de alimentos, de mercado y de vegetales, residuos sólidos agrícolas, forestales y agroindustriales y lodos provenientes del tratamiento de aguas servidas y de residuos líquidos industriales).

La NCh2880 busca promover la gestión adecuada y valorización de los subproductos y residuos sólidos orgánicos generados en Chile, evitar plagas, enfermedades y malezas relacionadas al producto y fomentar el desarrollo de la industria del compost en el país.

La NCh2880 establece los requisitos y la clasificación de calidad del compost producido a partir de residuos orgánicos y no es aplicable para el compost proveniente de residuos orgánicos peligrosos o infecciosos.

A continuación se mencionan los principales aspectos y clasificaciones de la NCh 2880 para la producción de compost:

La clasificación de los tipos de compost, se realiza en base a su nivel de calidad.

**Compost Clase A:** Es el producto con un alto nivel de calidad que cumple con las exigencias establecidas para el compost clase A. No presenta restricciones de uso. Debe cumplir con las concentraciones máximas de metales pesados en la tabla 3 de la norma, su conductibilidad eléctrica debe ser menor a tres decisiemens por metro y su relación carbono/nitrógeno debe ser menor o igual a 25.

**Compost Clase B:** Es el producto con un nivel intermedio de calidad que cumple con las exigencias establecidas para el compost clase B. Debe cumplir con las concentraciones máximas de metales pesados en la Tabla 4 de la norma, su conductibilidad eléctrica debe ser menor a ocho decisiemens por metro y su relación carbono/nitrógeno debe ser menor o igual a 30. Presenta algunas restricciones de uso si su conductividad eléctrica es mayor de tres decisiemens por metro.

La NCh2880 establece requisitos para la materia prima, e indica que cualquier residuo orgánico agrícola, forestal, ganadero, urbano, sólidos y líquidos de agroindustria y otros, que no estén contaminados con materiales no biodegradables por encima de las tolerancias de la norma, puede ser utilizada

como materia prima para compostaje, siendo posible compostar residuos provenientes de la industria de la madera, celulosa y de lodos provenientes de plantas de tratamiento de efluentes.

Las materias primas no deben de presentar un nivel de elementos traza mayor a los establecidos en la Tabla 4.

**Tabla 4.** Concentración máxima de elementos traza en las materias primas.

Elementos traza	Concentración máxima (mg/kg) base seca
Cadmio	10
Cobre	1.500
Cromo	1.000
Mercurio	10
Níquel	200
Plomo	800
Zinc	3.000

Fuente: INN, 2004.

Los lodos deben de tener una humedad menor o igual a 85% (expresada en base húmeda) para su posible compostaje.

Para el producto terminado (compost), la NCh2880 establece requisitos sanitarios, físicos y químicos, conductividad eléctrica y relación carbono/nitrógeno entre otros. Por se necesitaría de realizar experimentos sobre el compostaje de los residuos de la industria de celulosa (Corteza sucia, lodo de preparación de la madera y el lodo proveniente de la planta de tratamiento de efluentes) para determinar si se cumple con los parámetros establecidos. Estos ensayos deben de realizarse de acuerdo a los métodos que señala la NCh2880, en los que determina la cantidad de microorganismos contaminantes, parámetros químicos y físicos y parámetros de madurez del compost.

## 4.5 Evaluación de proyectos

La preparación y evaluación de proyectos busca recopilar, crear y analizar un conjunto de antecedentes económicos que permitan juzgar cualitativamente y cuantitativamente las ventajas y desventajas de asignar recursos a un determinado proyecto (Sapag and Sapag, 1991).

El problema de la selección de proyectos ha atraído la atención de la administración en las empresas. La selección de proyectos es un proceso de decisión muy complicado que se ve afectado por distintas variables críticas como las condiciones del mercado, materia prima, probabilidad de éxito y regulaciones, entre otros (Wang *et al.*, 2009).

Toda decisión de inversión debe responder a un estudio previo de las ventajas y desventajas asociadas a su implementación. Sin embargo, el grado o profundidad con que éste se realice depende de cada proyecto en particular. La viabilidad económica es el factor en el que normalmente se centra un estudio de inversión. Sin embargo, existen variables, como demanda, materia prima e insumos que pueden determinar que un proyecto se concrete o no, éstas variables pueden determinarse con un estudio técnico del proyecto. El estudio técnico busca analizar elementos que tienen relación con la ingeniería básica del producto y proceso, describiendo de forma detallada los requerimientos para su realización. En esta etapa se determinan los costos necesarios para la implementación del proceso, por lo que es base para el posterior estudio económico (Sapag and Sapag, 1991).

### 4.5.1 Criterios en la evaluación de proyectos

El objetivo de los criterios de evaluación económica es determinar la factibilidad económica de las opciones de proyectos de inversión técnicamente viables y

analizar el beneficio económico posterior a la inversión inicial. Para aplicar estos criterios de evaluación económica es necesario contar con la información sistematizada, expresada en términos monetarios, con la información obtenida en las etapas previas a la evaluación económica (CTPS, 2011).

Los criterios de económicos de evaluación pueden establecerse en base a la aplicación de los siguientes conceptos financieros:

*Flujo de caja:* Es el ingreso neto ocurrido en un determinado período y está dado por la diferencia entre el ingreso y el costo en dicho período. El criterio del flujo de caja es un buen indicador de rentabilidad de proyectos siempre y cuando la inversión inicial no afecte el balance de ingresos y egresos.

*Valor actual de costos:* Es el valor que representa los costos necesarios para llevar a cabo algún proyecto determinado. A diferencia del Valor presente neto, el Valor actual de costos toma en cuenta únicamente los egresos por cada período transcurrido con una tasa de interés o descuento (i).

## 5 Metodología

A continuación se presenta la metodología utilizada durante el desarrollo de este proyecto, según los objetivos específicos establecidos.

### 5.1 Área de estudio

El estudio se realizó con los residuos generados por la Celulosa Arauco y Constitución S.A. - Planta Nueva Aldea ubicada en la localidad de Nueva Aldea, comuna de Ránquil en la región del Bío-Bío (Figura 11).



**Figura 11.** Ubicación geográfica de la Celulosa Arauco y Constitución S.A. - Planta Nueva Aldea (Arauco, 2011).

## **5.2 Caracterización y cuantificación de los residuos sólidos provenientes de la industria de celulosa**

Los residuos caracterizados y cuantificados fueron: la corteza sucia, el lodo de preparación de la madera y la mezcla de lodos (primario y secundario) provenientes de la planta de tratamiento de efluentes. Las siglas CS (Corteza sucia), LPM (Lodo de preparación de la madera) y LTE (Lodo de tratamiento de efluentes) se utilizaron para referirse a dichos residuos en el presente trabajo.

Los datos de cuantificación de los residuos mencionados fueron proporcionados por la Celulosa Arauco y Constitución S.A. - Planta Nueva Aldea, los cuales corresponden a los promedios de generación de residuos durante los años 2008, 2009 y 2010.

Para la caracterización fisicoquímica se realizó para todos los residuos un análisis elemental (carbono total, nitrógeno total, hidrógeno total, oxígeno y azufre total), análisis del contenido de cenizas, poder calorífico, humedad y densidad aparente. Para el lodo de preparación de la madera se determinó también la granulometría y textura. Se tomaron muestras aleatorias de cada residuo estudiado (Figura 12).



**Figura 12.** Muestreo de residuos sólidos en Celulosa Arauco y Constitución S.A. - Planta Nueva Aldea. A) Corteza sucia, B) Lodo de preparación de la madera y C) Lodos de tratamiento de efluentes.



El análisis elemental y el carbono orgánico total se realizó a través de un Analizador Elemental Fisons EA1108 (Figura 13) en el Laboratorio de Recursos Naturales (Centro de Biotecnología) de la Universidad de Concepción. Para este análisis las muestras debieron ser molidas y luego 2 mg fueron calcinadas 1.000°C en un horno que forma parte del mismo analizador. La humedad fue determinada en una termo-balanza a 105°C durante 60 minutos.



**Figura 13.** Analizador elemental FISIONS EA 1108.

El poder calorífico y el contenido de cenizas de los residuos fueron determinados de acuerdo a ASTM D-5865 (2004) y ASTM D3174-04 (2010), respectivamente, por el Instituto de Investigaciones Tecnológicas de la Universidad de Concepción.

La materia orgánica de los residuos se determinaron de acuerdo a la metodología seguida por INIA (2005) en el Laboratorio de Química y la granulometría y textura por los métodos de McManus, 1988 y Wentworth, 1922 en el Laboratorio de Sedimentología del Centro EULA-Chile.

Los contenidos totales (por calcinación) y disponibles de los elementos macro y micro nutrientes (N, P, K, Ca, Mg, Na, Cu, Fe, Mn, Zn y B), el contenido de materia orgánica y de carbono del lodo de preparación de la madera fueron determinados a través de las metodologías empleados por INIA (2005) y fueron proporcionados por la Celulosa Arauco y Constitución S.A. - Planta Nueva Aldea.

### **5.3 Definición e identificación de los requerimientos técnicos de cada alternativa de destinación de los residuos**

Se estudiaron 2 alternativas de destinación de los residuos las cuales fueron: el proceso de compostaje y el uso para generación de energía, para posteriormente ser comparadas con la disposición actual de los residuos (disposición en vertedero). Se analizaron distintos escenarios con el objetivo de conocer el óptimo en cuanto a aspectos técnicos, económicos y ambientales.

Los escenarios analizados fueron:

Escenario 1: Elaboración de compost con corteza sucia, lodo de preparación de la madera y lodo del tratamiento de efluentes, considerando el proceso con o sin tamizado para su comercialización o uso propio, respectivamente.

Escenario 2: Elaboración de compost con lodos de preparación de la madera y del tratamiento de efluentes y corteza sucia tamizada para la producción de energía.

Escenario 3: Producción de energía mediante la quema de lodo de preparación de la madera y corteza tamizada.

#### *5.3.1 Estudio del compostaje*

Para el estudio del compostaje se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones:

- a) Desde el punto de vista técnico, se eligió como alternativa viable aquella que considera un proceso de compostaje aerobio en hileras con volteo mecanizado.
- b) La utilización de la cantidad total de corteza sucia y lodo de preparación de la madera, y la cantidad necesaria de lodos de la planta de tratamiento de

efluentes para una mezcla ideal (relación C/N entre 25 y 35) de materia prima para el proceso de compostaje

Se establecieron las cantidades de cada insumo al determinar la relación C/N mediante las siguientes ecuaciones (Guerrero & Monsalve, 2006):

- *Mezclado*
    - Contenido de agua = (Cantidad a compostar) x (humedad)
    - Contenido de materia seca = (Cantidad a compostar) x (1 - humedad)
    - Contenido de Nitrógeno = (Contenido de materia seca) x (%Nitrógeno)
    - Contenido de Carbono = (Contenido de nitrógeno) x (Relación C/N)
  
  - *Fórmulas para determinar la relación C/N y humedad resultantes de la mezcla a compostar*
    - Nitrógeno en mezcla =  $\Sigma$  contenido de nitrógeno de cada residuo
    - Carbono en mezcla =  $\Sigma$  contenido de carbono de cada residuo
    - Relación C/N resultante = Carbono en mezcla/Nitrógeno en mezcla
    - Agua en mezcla =  $\Sigma$  contenido de agua de cada residuo
    - Humedad resultante (%) = (Agua en mezcla) x (Cantidad total a compostar)
- c) La destinación del compost producido: para uso propio de la empresa de Celulosa Arauco y Constitución S.A. – Planta Nueva Aldea o para su comercialización,
- d) El tiempo del proceso de compostaje,
- e) El área de la cancha de compostaje,
- f) Los equipos, infraestructura necesaria y los insumos necesarios como combustible y energía.
- g) Los aspectos legales y las normativas para la producción del compost (NCh 2880 Of. 2004 y D.S. N°4/2009).

### 5.3.2 Estudio de la producción de energía

Para el estudio de la incineración de los residuos y la generación de energía se tomaron en cuenta principalmente las consideraciones referentes a las características de los residuos y su potencial para generación de energía.

Se determinó la cantidad de energía en forma de calor por unidad de masa de cada residuo. Posteriormente se analizó su potencial para generar calor aprovechable para la producción de energía eléctrica.

### 5.4 Estudio de la viabilidad económica de cada una de las alternativas

Se determinaron los costos de equipos y máquinas requeridas, además de la cuantificación de los consumos, con lo cual se calculó el monto total de la inversión y los costos anuales de operación.

Los costos de operación se determinaron en base a los consumos anuales de cada requerimiento del proceso.

Los precios de insumos, combustible y electricidad fueron obtenidos en base de la fecha abril 2011 y según la variación del Índice de Precios al Consumidor, a través de un modelo utilizado en la página web del Instituto Nacional de Estadísticas basada en la ecuación matemática siguiente:

$$\text{Variación porcentual} = \left| \left( \frac{\text{Índice de abril de 2011}}{\text{Índice de la fecha reportada}} \right) * 100 \right| - 100$$

El precio unitario del combustible fue establecido por la Comisión Nacional de Energía (CNE, 2008), los precios unitarios del agua y la electricidad se establecieron por el precio actual de dichos insumos. Los precios actualizados para abril del 2011 se muestran en la Tabla 5. **Costos de insumos (\$)**

**Tabla 5.** Costos de insumos (\$).

	Unidad	Precio unitario	Precio unitario actualizado
Combustible	L	552 (12/2007)	613
Disposición residuos	m <sup>3</sup>	-----	10380
Aplicación de compost	m <sup>3</sup>	-----	15891

Fuente: CNE, 2008; Arauco, 2011; INDAP, 2011.

Por otra parte, a partir de la composición de los datos y el valor actual del compost, se le otorgó un valor económico a la cantidad total de compost producido.

Con los valores de los precios anteriores y el flujo de producción establecido se realizó el cálculo del valor actual de costos (VAC), que permite comparar las alternativas para la destinación de residuos.

El VAC se calculó de acuerdo a la siguiente ecuación matemática:

$$VAC = \sum_{t=0}^n \frac{c_t}{(1+i)^t}$$

Donde, “i” es la tasa de interés, “t” es el número de periodos de tiempo y “c” son los costos del periodo “t”.

## 6 Resultados y Discusión

En este capítulo se presentan los resultados del estudio técnico y económico del proceso de compostaje como alternativa de destinación de los residuos sólidos orgánicos provenientes del proceso Kraft y los requerimientos técnicos que conlleva dicho proceso, así como su análisis de beneficios y costos frente a la quema de los residuos para la generación de energía y la disposición actual.

### 6.1 Cuantificación de residuos

La cantidad de residuos sólidos generados por el proceso Kraft en la Planta de Celulosa Arauco y Constitución, Nueva Aldea, se presentan en la Tabla 6. En el caso del lodo proveniente de tratamiento de efluentes solo se tiene un promedio de los primeros 2 meses del año 2010.

**Tabla 6.** Cuantificación de los residuos sólidos (m<sup>3</sup>/mes).

Residuo	Densidad (ton/m <sup>3</sup> )	Producción (m <sup>3</sup> /mes)				Promedio producción (ton/mes)	Costo total disposición (\$/mes)
		2008	2009	2010	Promedio		
CS	0,5	1.709	1.452	1.587	1.582	791	16.427.400
LPM	1,0	1.029	1.167	1.094	1.096	1.096	11.383.750
LTE	1,07	-	-	5.632	5.632	6.026	-
Cenizas de LTE	0,54	-	-	-	516	279	5.356.080

Fuente: (Arauco, 2011).

Debido a la alta cantidad de residuos generados mensualmente por el proceso productivo de la celulosa Kraft, el análisis se realizó, por conveniencia, el análisis con la producción diaria de dichos residuos, presentada en la Tabla 7.

**Tabla 7.** Toneladas de residuos producidas al día.

<b>Residuo</b>	<b>Toneladas/día</b>
Corteza sucia	26
Lodo de preparación de la madera	36
Lodo de planta de tratamiento de efluentes	201

## 6.2 Caracterización de residuos

Los resultados del análisis elemental y el análisis del contenido de ceniza, poder calorífico, humedad y densidad aparente de los residuos se muestran en la Tabla 8.

**Tabla 8.** Caracterización de los residuos.

<b>Parámetro</b>	<b>CS</b>	<b>LPM</b>	<b>LTE</b>
Poder calorífico superior BCR (kcal/kg)	1.727	356	688
Poder calorífico superior BS (kcal/kg)	3.327	909	3.560
Humedad (%)	48,09	60,82	80,67
Sólidos totales (% p/p ± RSD)	72,45	36,44	77,39
Ceniza BCR (%)	48,09	30,86	4,63
Ceniza BS (%)	49,35	78,77	23,94
Carbono (% p/p ± RSD)	47,7 ± 0,0	10,4 ± 0,1	38,1 ± 0,0
Hidrógeno (% p/p ± RSD)	5,4 ± 0,0	1,5 ± 0,1	5,2 ± 0,0
Nitrógeno (% p/p ± RSD)	0,16 ± 0,02	0,23 ± 0,12	3,0 ± 0,0
Azufre (% p/p)	< 2	< 2	< 2
Relación (C/N)	298,12	45,22	12,7

El poder calórico inferior se determinó con la siguiente fórmula:  $PCI = PCS - 540 * (\%h / \%mt)$  (Barbosa, *et al.*, 2008; Arauco, 2008)

Dónde: “PCI” es el poder calórico inferior (el calor realmente aprovechable), “PCS” es el poder calórico superior, “%h” es el porcentaje de humedad y “%mt” es el porcentaje de materia seca. El valor de 540 representa el calor latente para el agua en kcal/kg.

**Tabla 9.** PCI de cada residuo.

Residuo	PCS BS	PCI BS	
	kcal/kg	kcal/kg	MJ/kg
CS (tamizada)	4500,00*	3999,74	16,75
LPM	909,00	70,75	0,30
LTE	3560,00	1306,41	5,47

\*Al tamizar la CS, se obtendría una corteza muy similar a la corteza limpia, por lo que se utilizó un poder calórico referenciado (Rodrigues *et al.*, 2010)

### 6.3 Definición e identificación de los requerimientos técnicos de cada alternativa de destinación de los residuos.

A continuación se presentan los resultados correspondientes al estudio técnico del proceso de compostaje y la combustión para la generación de energía como estrategias de destinación de los residuos sólidos provenientes de la industria de celulosa.

El tipo de proceso estudiado para el compostaje fue un sistema abierto en hileras por volteo, en el cual una máquina volteadora se encargará de airear el material realizando un volteo semanal, o cuando la temperatura de la pila llegue a su máximo (60°C), es decir, un aproximado de 4 o 5 volteos al mes. En el caso en que se necesite tamizar compost, el material será procesado a través de una tamizadora industrial. El control de peso se realizará con el objetivo de realizar una correcta mezcla inicial con los parámetros adecuados para el proceso. El tiempo estimado de producción es de 3 a 4 meses.



El equipo considerado para el volteo en el proceso de compostaje es una máquina volteadora, la cual se muestra en la Figura 14.



**Figura 14.** Máquina volteadora (BACKHUS)

El equipo considerado para el tamizado del producto final es una tamizadora, la cual es mostrada en la Figura 15.



**Figura 15.** Tamizadora JOKER

Los rendimientos de la máquina volteadora y de la tamizadora son de 500m<sup>3</sup>/h y 35m<sup>3</sup>/h respectivamente. En la Tabla 10 se muestra el consumo de combustible (diesel) de cada una de ellas por hora.

**Tabla 10.** Consumo de combustible.

<b>Máquina</b>	<b>Potencia (kW)</b>	<b>Poder calorífico diesel (kcal/lit)</b>	<b>potencia diesel (kWh/lit)</b>	<b>diesel/hora (lit/h)</b>
Diesel necesario para la volteadora	23.00	8800.00	10.23	2.25
Diesel necesario para la tamizadora	16.50	8800.00	10.23	1.61

Los escenarios fueron comparados contemplando el proceso de compostaje, la combustión en la caldera de biomasa y su consecuente generación de energía, y la disposición en vertederos. Los requerimientos técnicos asociados a cada escenario se presentan a continuación.

### 6.3.1 Escenario actual

Como se mencionó anteriormente los residuos estudiados CS y LPM son dispuestos en un vertedero interno de la empresa. Mientras que los LTE son quemados en la caldera de biomasa y las cenizas resultantes del proceso de combustión son dispuestos en un mismo vertedero interno de la empresa.

En este escenario hay una pérdida de energía relacionada al secado de los LTE, debido a su alto contenido de agua. La energía generada por los lodos satisface únicamente el 58% del calor necesario para la evaporación del agua, por lo tanto, es necesario energía extra para un completo secado del lodo. Se estima una generación diaria de cenizas de 9,3 t (17,2 m<sup>3</sup>), que representan un 4,63% del total de LTE que entra a la caldera por día. El balance de masa y energía resultante en este escenario es presentado en la Tabla 11.

**Tabla 11.** Balance de masa y energía del Escenario actual de disposición de los residuos (E<sub>0</sub>).

Residuo	Vertedero		Combustión					
	Cantidad (t/d)	Entrada a la Caldera			Salida de la Caldera			
		Cantidad (t/d)	Materia seca (t)	PCI BS <sup>1</sup> (MJ/t)	Calor aprovechable <sup>2</sup> (MJ/d)	Calor de secado <sup>3</sup> (MJ/d)	Calor Neto <sup>4</sup> (MJ/d)	Ceniza (t/d)
CS	26	0	0	16.749	0	0	0	0
LPM	36	0	0	296	0	0	0	0
LTE	0	201	39	5.471	212.557	366.663	-154.107	9,31

<sup>1</sup>Poder calorífico inferior- base seca; <sup>2</sup> Energía producida por los LTE secos; <sup>3</sup> El calor necesario de secado de los residuos igual a 540 kcal/kg \* %h de cada residuo; <sup>4</sup> Energía complementar necesaria para secado del lodo.

6.3.2 Escenario 1: *Elaboración de compost con corteza sucia, lodo de preparación de la madera y la cantidad necesaria de lodos del tratamiento de efluentes, considerando el tamizado de la corteza sucia para su comercialización o uso propio y el porcentaje necesario de lodo del tratamiento de efluentes en la mezcla.*

a) *Proceso de compostaje considerando una relación C:N de 30:1*

En función a la relación C:N óptima necesaria para la mezcla inicial de un proceso de compostaje, se encontraron las cantidades necesarias de cada materia prima, (Tabla 12). Cabe señalar que los LTE contienen nitrógeno suficiente para satisfacer la relación C:N de 30:1 y humedad de 68%, utilizando la totalidad producida de la CS y el LPM. En estas condiciones, la cantidad requerida de los LTE es de 31% (62 t) del total generado y 139 t de LTE continuarían destinados a la combustión y generación de energía. La cantidad de LTE necesario para el

compostaje se determinó utilizando las ecuaciones presentadas por Guerrero & Monsalve (2006).

**Tabla 12.** Cantidad necesaria de residuos del compostaje en el escenario E<sub>1a</sub>.

Residuo	Cantidad		Porcentaje del total generado (%)
	t/día	m <sup>3</sup> /día	
Corteza sucia (CS)	26	52	100
Lodo de preparación de la madera (LPM)	36	36	100
Lodos del tratamiento de efluentes (LTE)	62	58	31

Por lo tanto, el volumen total diario de la mezcla para el compostaje sería de 146 m<sup>3</sup> en un terreno de alrededor 240 m<sup>2</sup>, en el que alcanzarían dos pilas de 2,8 m de ancho, 1,2 m de alto y 40 m de largo. Estas medidas se establecieron en base a las especificaciones técnicas de la máquina volteadora (Máquina Volteadora Backhus 14.28) en Anexo 1.

Para el uso de la volteadora, mensualmente se necesitaría un área aproximada de 8.640 m<sup>2</sup>, incluyendo el área requerida para su movimiento (20%).

De esta manera, se espera una reducción de 30 a 60% en la masa del residuo durante el proceso de compostaje debido a la degradación de la materia orgánica y la pérdida de agua (Moreno & Moral, 2008), teniendo una cantidad diaria de compost de 50 a 87 t, correspondiente a una cantidad de 45 a 78 t de compost tamizado.

La utilización del 31% (62 t) de los LTE en el proceso de compostaje tiene un impacto positivo en el sistema de combustión para la generación de energía. Esta situación es similar al escenario actual, pero tiene una menor pérdida de calor para el secado de los LTE, proporcional a la cantidad de LTE destinado al compostaje. La generación diaria de cenizas es de 6,4 t (11,9 m<sup>3</sup>). En la Tabla 13 se presenta el balance de masa y energía para este escenario.

**Tabla 13.** Balance de masa y energía para el escenario E<sub>1a</sub>.

Combustión							
Residuo	Entrada a la Caldera			Salida de la Caldera			
	Cantidad	Materia seca	PCI BS <sup>1</sup>	Calor aprovechable <sup>2</sup>	Calor de secado <sup>3</sup>	Calor Neto <sup>4</sup>	Ceniza
	(t/d)	(t)	(MJ/t)	(MJ/d)	(MJ/d)	(MJ/d)	(t/d)
CS	0	0	16.749	0	0	0	0
LPM	0	0	296	0	0	0	0
LTE	139	26,85	5.471	146.992	253.563	-106.571	6,44
Total	139	26,85	-	146.992	253.563	-106.571	6,44

<sup>1</sup>Poder calorífico inferior- base seca; <sup>2</sup> Energía producida por los LTE secos; <sup>3</sup> El calor necesario de secado de los residuos igual a 540 kcal/kg \* %h de cada residuo; <sup>4</sup> Energía complementar necesaria para secado del lodo.

*b) Proceso de compostaje considerando una relación C:N de 25:1*

En función de la utilización máxima de LTE para el compostaje se alcanzó una relación C:N de 25:1 y humedad de 70%, siendo un valor límite para un eficiente proceso de compostaje. En estas condiciones, la cantidad requerida de los LTE es de 45% (90 t) del total generado. En este caso, quedarían disponibles 111 t de LTE destinados a la combustión y generación de energía.

**Tabla 14.** Cantidad necesaria de residuos del compostaje en el escenario E<sub>1b</sub>.

Residuo	Cantidad		Porcentaje del total generado (%)
	t/día	m <sup>3</sup> /día	
Corteza sucia (CS)	26	52	100
Lodo de preparación de la madera (LPM)	36	36	100
Lodos del tratamiento de efluentes (LTE)	90	84	45

Por lo tanto, el volumen total diario de la mezcla para el compostaje sería de 172 m<sup>3</sup> en un terreno de alrededor 286 m<sup>2</sup>, en el que alcanzarían dos pilas de 2,8 m de ancho, 1,2 m de alto y 50 m de largo. Estas medidas se establecieron en base a las especificaciones técnicas de la máquina volteadora (Máquina Volteadora Backhus 14.28) en Anexo 1.

Para el uso de la volteadora, mensualmente se necesitaría un área aproximada de 10.296 m<sup>2</sup>, incluyendo el área requerida para su movimiento (20%).

Como en el anterior escenario, se espera una reducción de 30 a 60% en la masa del residuo durante el proceso de compostaje debido a la degradación de la materia orgánica y la pérdida de agua (Moreno y Moral, 2008), teniendo una cantidad diaria de compost de 61 a 106 t, correspondiente a una cantidad de 55 a 95 t de compost tamizado.

La utilización del 45% (90 t) de los LTE en el proceso de compostaje tiene un impacto positivo en el sistema de combustión para la generación de energía. Esta situación es similar al escenario actual, pero con una menor pérdida de calor para el secado de los LTE, proporcional a la cantidad de LTE destinado al compostaje. La generación diaria de cenizas es de 5,14 t (9,51 m<sup>3</sup>). En la Tabla 15 se presenta el balance de masa y energía para este escenario.

**Tabla 15.** Balance de masa y energía para el escenario E<sub>1b</sub>.

Combustión							
Residuo	Entrada a la Caldera				Salida de la Caldera		
	Cantidad	Materia seca	PCI BS <sup>1</sup>	Calor aprovechable <sup>2</sup>	Calor de secado <sup>3</sup>	Calor Neto <sup>4</sup>	Ceniza
	(t/d)	(t)	(MJ/t)	(MJ/d)	(MJ/d)	(MJ/d)	(t/d)
CS	0	0	16.749	0	0	0	0
LPM	0	0	296	0	0	0	0
LTE	111	21	5.471	117.382	202.486	- 85.104	5,14
Total	111	21	-	117.382	202.486	- 85.104	5,14

<sup>1</sup>Poder calorífico inferior- base seca; <sup>2</sup> Energía producida por los LTE secos; <sup>3</sup> El calor necesario de secado de lodo igual a 540 kcal/kg \* %h del lodo; <sup>4</sup> Energía complementaria necesaria para secado del lodo.

### 6.3.3 Escenario 2: Elaboración de compost con lodo de preparación de la madera y la cantidad necesaria de lodo del tratamiento de efluentes, y uso de la corteza sucia tamizada para la producción de energía

#### a) Proceso de compostaje considerando una relación C:N de 30:1

Para este escenario se cuenta con el LPM y los LTE para la elaboración de compost. Cabe señalar que, se dispone de la totalidad del LPM (36 t) y la cantidad requerida de LTE (relación C/N de 30 y humedad de 63,2%) fue determinada de la misma manera que para el *Escenario 1* y se presenta en la Tabla 16.

**Tabla 16.** Cantidad necesaria de residuos del compostaje en el escenario E<sub>2a</sub>.

Residuo	Cantidad		Porcentaje del total generado (%)
	t/día	m <sup>3</sup> /día	
Corteza sucia (CS)	0	0	0
Lodo de preparación de la madera (LPM)	36	36	100
Lodos del tratamiento de efluentes (LTE)	5	4,67	2,5

Por lo tanto, diariamente el volumen total de la mezcla destinado al compostaje sería de 41 m<sup>3</sup> en un área aproximada de 67,2 m<sup>2</sup>, para formar una pila de 2,8 m de ancho, 1,2 m de alto y 24 m de largo al día. Para este escenario se obtendrían de 16 a 29 t de compost.

En este caso, 196 toneladas de LTE continuarían destinándose a la combustión, además de 13,5 toneladas de CS tamizada (sin piedras) destinadas a la combustión y generación de energía.

**Tabla 17.** Balance de masa y energía para el escenario E<sub>2a</sub>.

Residuo	Combustión						
	Entrada a la Caldera				Salida de la Caldera		
	Cantidad	Materia seca	PCI BS <sup>1</sup>	Calor aprovechable <sup>2</sup>	Calor de secado <sup>3</sup>	Calor Neto <sup>4</sup>	Ceniza
	(t/d)	(t)	(MJ/t)	(MJ/d)	(MJ/d)	(MJ/d)	(t/d)
CS(tamizada)	13,5	7	16.749	117.347	14.677	102.670	0
LPM	0	0	296	0	0		0
LTE	196	38	5.471	207.269	357.542	-150.273	9,07
Total	209,5	45	-	324.616	372.219	-47.603	9,07

<sup>1</sup>Poder calorífico inferior- base seca; <sup>2</sup> Energía producida por los LTE secos y CS tamizada; <sup>3</sup> El calor necesario de secado de lodo igual a 540 kcal/kg \* %h del lodo; <sup>4</sup> Energía complementaria necesaria para secado del lodo



La combustión de la corteza sucia tamizada, genera un calor que ayuda al secado de los LTE, sin embargo, debido a la humedad presentada en dicho lodo, la energía aún es insuficiente para el secado. Para este escenario existe una menor pérdida de calor para el secado de los LTE, proporcional a la cantidad de LTE destinado al compostaje, además del aporte de la corteza sucia tamizada destinada a la combustión. La generación diaria de cenizas es de 9,07 t (16.8 m<sup>3</sup>).

*b) Proceso de compostaje considerando una relación C:N de 25:1*

Para este escenario se cuenta con el LPM y los LTE para la elaboración de compost. Cabe señalar que, se dispone de la totalidad del LPM (36 t) y la cantidad requerida de LTE (relación C/N de 25 y humedad de 63,2%) fue determinada de la misma manera que para el *Escenario 1* y se presenta en la, se analizó el escenario con la máxima cantidad de LTE posible para el proceso de compostaje, con el objetivo de evaluar el posible impacto positivo en la caldera de biomasa.

**Tabla 18.** Cantidad necesaria de residuos del compostaje en el escenario E<sub>2b</sub>.

Residuo	Cantidad		Porcentaje del total generado (%)
	t/día	m <sup>3</sup> /día	
Corteza sucia (CS)	0	0	0
Lodo de preparación de la madera (LPM)	36	36	100
Lodos del tratamiento de efluentes (LTE)	9	8,41	4,5

Por lo tanto, diariamente el volumen total de la mezcla destinado al compostaje sería de 44 m<sup>3</sup> en un área aproximada de 73 m<sup>2</sup>, para formar una pila de 2,8 m de

ancho, 1,2 m de alto y 26 m de largo al día. Para este escenario se obtendrían de 18 a 31 t de compost.

En este caso, 196 toneladas de LTE continuarían disponiéndose en la caldera, además de 13,5 toneladas de CS tamizada (sin piedras) para la generación de energía.

**Tabla 19.** Balance de masa y energía para el escenario E<sub>2b</sub>.

Residuo	Combustión						
	Entrada a la Caldera				Salida de la Caldera		
	Cantidad (t/d)	Materia seca (t)	PCI BS <sup>1</sup> (MJ/t)	Calor aprovechable <sup>2</sup> (MJ/d)	Calor de secado <sup>3</sup> (MJ/d)	Calor Neto <sup>4</sup> (MJ/d)	Ceniza (t/d)
CS(tamizada)	13,5	7	16.749	117.347	14.677	102.670	0
LPM	0	0	296	0	0	0	0
LTE	192	37	5.471	203.039	350.246	-147.207	9,07
Total	209,5	44	-	320.386	364.923	-44.537	9,07

<sup>1</sup>Poder calorífico inferior- base seca; <sup>2</sup> Energía producida por los LTE secos y CS tamizada; <sup>3</sup> El calor necesario de secado de lodo igual a 540 kcal/kg \* %h del lodo; <sup>4</sup> Energía complementaria necesaria para secado del lodo

Al igual que en el escenario E<sub>1a</sub>, la corteza sucia tamizada, ayudó al secado de los lodos, por lo que se produce una menor pérdida de energía, sin embargo, la humedad de LTE, hace insuficiente el calor generado por el mismo y por la corteza sucia, aunque en una menor escala que la situación actual y otros escenarios.

### 6.3.4 *Escenario 3: Producción de energía mediante la combustión del lodo de preparación de la madera y corteza sucia tamizada*

Para este escenario, se analizó la producción de energía de la totalidad de las cantidades de CS (previamente tamizada) y de los LTE generadas, cuyos valores se presentan en la Tabla 20. Cabe señalar que debido al bajo poder calórico (356 kcal/kg en base húmeda) y al contenido de cenizas (31%) en el LPM, no resulta técnicamente factible su combustión en la caldera para la generación de energía. Este escenario contemplaría la opción de destinación en el vertedero del LPM y las cenizas.

**Tabla 20.** Balance de masa y energía para el escenario E<sub>3</sub>.

Residuo	Combustión						
	Entrada a la Caldera				Salida de la Caldera		
	Cantidad (t/d)	Materia seca (t)	PCI BS <sup>1</sup> (MJ/t)	Calor aprovechable <sup>2</sup> (MJ/d)	Calor de secado <sup>3</sup> (MJ/d)	Calor Neto <sup>4</sup> (MJ/d)	Ceniza (t/d)
CS(tamizada)	13,5	7	16.749	117.347	14.677	102.670	0
LPM	0	0	296	0	0	0	0
LTE	201	39	5.471	212.557	366.663	-154.106	9,31
Total	214,5	46	-	329.904	381.340	- 51.436	9,31

<sup>1</sup>Poder calorífico inferior- base seca; <sup>2</sup> Energía producida por los LTE secos y CS tamizada; <sup>3</sup> El calor necesario de secado de lodo igual a 540 kcal/kg \* %h del lodo; <sup>4</sup> Energía complementaria para secado del lodo (que se deja de generar).

Debido a que este escenario contempla únicamente la combustión de los residuos para la generación de energía, la totalidad de LPM, 36 toneladas al día tienen que ser dispuesto en el vertedero debido a que sus características fisicoquímicas no permiten su quema en la caldera. La energía faltante para el secado de los lodos, es de manera muy reducida, mayor al escenario 2, debido a que se está

quemando el 100% del LTE. El aporte de calor que genera la corteza sucia tamizada es igual al escenario 2.

En la Tabla 21 se presenta un resumen de las cantidades de entrada y salida de proceso de compostaje, combustión para la generación de energía y vertedero de cada escenario propuesto.

**Tabla 21.** Cantidades de residuos y compost y/o energía producida en cada escenario estudiado.

Escenario	Disposición en Vertedero			Elaboración de compost			Cantidad compost final (t/d)	Producción de energía			Energía neta (MJ)
	Cantidad residuo (t/d)			Cantidad residuo (t/d)				Cantidad residuo (t/d)			
	CS	LPM	Cenizas LTE	CS	LPM	LTE		CS	LP M	LTE	
E <sub>0</sub>	26	36	9,3	0	0	0	0	0	0	201	-154.106
E <sub>1a</sub> ( C/N 30/1)	0	0	6,43	26	36	62	50-87	0	0	139	-106.571
E <sub>1b</sub> ( C/N 25/1)	0	0	5,13	26	36	90	61-106	0	0	111	- 85.104
E <sub>1a</sub> (CS tamizado)	2,6*	0	6,43	26	36	62	45-78	0	0	139	- 106.571
E <sub>1b</sub> (CS tamizado)	2,6*	0	5,13	26	36	90	55-95	0	0	111	- 85.104
E <sub>2a</sub> ( C/N 30/1)	2,6*	0	9,07	0	36	5	16-29	13,5	0	196	- 47.593
E <sub>2b</sub> ( C/N 25/1)	2,6*	0	8,87	0	36	9	18-31	13,5	0	192	- 44.527
E <sub>3</sub>	2,6*	36	9,3	0	0	0	0	13,5	0	201	- 51.426

\*Representa el 10% en piedras en la CS

## 6.4 Estudio de la viabilidad económica de cada una de las alternativas

De acuerdo a los costos de inversión y operación de cada escenario estudiado, se realizó el siguiente análisis económico.

El costo total de inversión y los costos anuales de operación son presentados de acuerdo a cada escenario propuesto. Los costos de operación se determinaron en base a los consumos anuales de cada requerimiento del proceso.

El costo de inversión se determinó según el requerimiento de cada escenario, en la que la maquinaria involucrada sería una máquina volteadora marca Backhus para el proceso de compostaje y una tamizadora de la Compañía Komptech.

### 6.4.1 Análisis de la Situación Actual

Los costos de operación para el escenario actual ( $E_0$ ) se muestran en la Tabla 22.

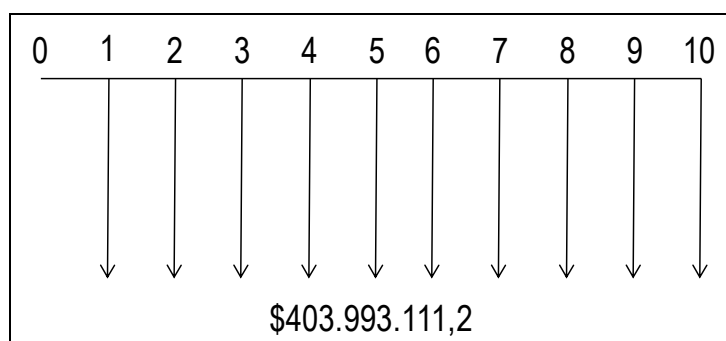
**Tabla 22.** Costos de operación mensual escenario actual  $E_0$ .

Ítem	Total m <sup>3</sup>	Costo \$/m <sup>3</sup>	Costo total (\$)
Disposición CS	1.583	10.380,00	16.428.114,60
Disposición LPM	1.097	10.380,00	11.383.434,60
Disposición LTE (ceniza)	516	10.380,00	5.360.543,40
Biomasa para secado	988	500,00	494.000,00
Total			33.666.092,60

Para el escenario actual, la actividad que representa un mayor costo es la disposición de la corteza sucia, 49% del total, seguido de la disposición del lodo de preparación de la madera (34%) y la disposición de las cenizas generadas del proceso de combustión del lodo de tratamiento de efluentes (17%).

Además, existe un costo asociado al consumo de biomasa que es utilizada para el secado del LTE, presentado en la Tabla 22. El poder calórico de la biomasa (4297 kcal/kg) y su costo son datos proporcionados por la empresa. El costo de quemar el LTE en la caldera de biomasa, resulta económicamente más viable que una disposición en el vertedero.

El escenario actual representa un costo anual constante de \$403.993.111,2. En la Figura 16 se muestra el flujo de caja en relación a los costos para este escenario y se determinó un VAC para un período de 10 años y una tasa de descuento de 10% de \$2.482.362.782,01.



**Figura 16.** Flujo de costos Situación actual.

6.4.2 Escenario 1: *Elaboración de compost con corteza sucia, lodo de preparación de la madera y la cantidad necesaria de lodos del tratamiento de efluentes, considerando el tamizado de la corteza sucia para su comercialización o uso propio y el porcentaje necesario de lodo del tratamiento de efluentes en la mezcla*

a) *Proceso de compostaje considerando una relación C:N de 30:1*

El costo de inversión y los costos de operación para el proceso de compostaje sin el tamizado del compost se muestran en la Tabla 23.

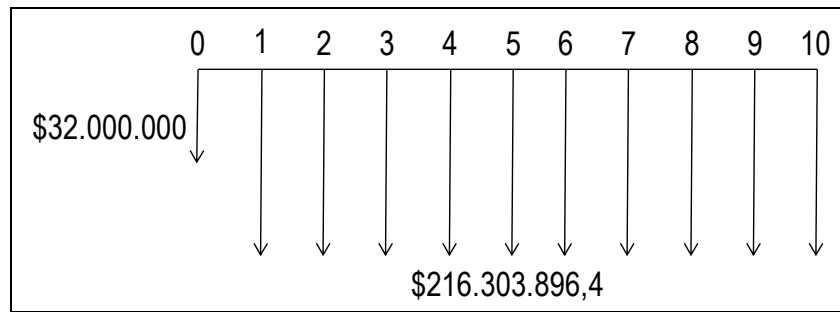
**Tabla 23.** Costos de inversión y operación para el escenario E<sub>1a</sub> (sin tamizar).

Ítem	Unidad de medida	Total	Costo unitario (\$)	Costo total (\$)
<b>Costo de inversión</b>				
Volteadora	und	1	32.000.000	32.000.000
<b>Costos de operación</b>				
Máquina Volteadora	Hora	45	1.377,61	61.992,45
Tamizadora	Hora	0	988,28	0,00
Operario volteadora	Hora	45	2.000,00	90.000,00
Operario tamizadora	Hora	0	2.000,00	0,00
Aplicación compost*	m <sup>3</sup>	870	15.891,00	13.825.170,00
Disposición ceniza	m <sup>3</sup>	357	10.380,00	3.705.660,00
Biomasa para secado	m <sup>3</sup>	685	500,00	342.500,00
Total				18.025.322,45

Para este escenario, las operaciones que representan un mayor porcentaje en relación al costo total son aquellas asociadas al proceso del compostaje (uso de la volteadora y aplicación del compost), sin embargo la disposición de cenizas se reduce un 31%, debido al uso del LTE en el compostaje.

El escenario E<sub>1a</sub>, proceso sin tamizar, representa un costo total de inversión de \$32.000.000 y un costo de operación anual constante de \$216.303.896,4. En la Figura 17 se muestra el flujo de caja en relación a los costos para este escenario y se determinó un VAC para un período de 10 años y una tasa de descuento de 10% de \$1.361.093.806,66.





**Figura 17.** Flujo de costos escenario E<sub>1a</sub> (Sin tamizar).

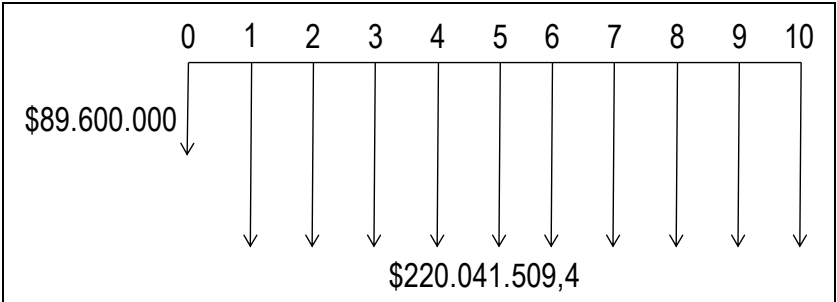
Los costos de inversión y operación para el escenario 1<sub>a</sub>, considerando el tamizado del compost, se presentan en las Tabla 24.

**Tabla 24.** Costo de inversión y operación para el escenario E<sub>1a</sub> (tamizado).

Ítem	Unidad de medida	Total	Costo unitario (\$)	Costo total (\$)
<b>Costo de inversión</b>				
Volteadora	und	1	32.000.000,00	32.000.000,00
Tamizadora	und	1	57.600.000,00	57.600.000,00
<b>Costos de operación</b>				
Máquina Volteadora	Hora	45	1.377,61	61.992,45
Tamizadora	Hora	25	988,28	24.707,00
Operario volteadora	Hora	45	2.000,00	90.000,00
Operario tamizadora	Hora	25	2.000,00	50.000,00
Aplicación compost*	m <sup>3</sup>	783	15.891,00	12.442653,00
Disposición ceniza	m <sup>3</sup>	357	10.380,00	3.705.660,00
Disposición piedras	m <sup>3</sup>	156	10.380,00	1.619.280,00
Biomasa para secado	m <sup>3</sup>	685	500,00	342.500,00
<b>Total</b>				<b>18.336.7922,42</b>

Para este escenario existe un costo adicional, relacionado al tamizado del compost final y a la disposición de las piedras resultantes de dicho proceso. Este costo representa el 9,37% del costo total.

El escenario 1<sub>a</sub>, proceso tamizado, tiene un costo total de inversión de \$89.600.000,00 y un costo de operación anual constante de \$220.041.509,4. En la Figura 18 se muestra el flujo de caja relacionado a los costos de este escenario y se determinó un VAC de \$1.441.659.820,55 para un período de 10 años y una tasa de descuento del 10%.



**Figura 18.** Flujo de costos escenario E<sub>1a</sub> (Tamizado).

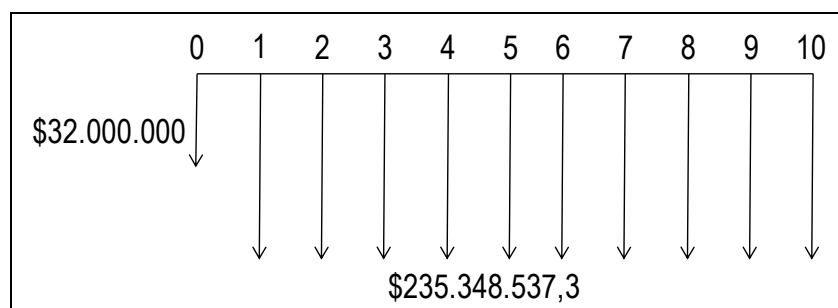
*b) Proceso de compostaje considerando una relación C:N de 25:1*

El costo de inversión y los costos de operación para el proceso de compostaje sin el tamizado del compost se muestran en la Tabla 25.

**Tabla 25.** Costo de inversión y operación escenario E<sub>1b</sub>. (sin tamizar).

Ítem	Unidad de medida	Total	Costo unitario (\$)	Costo total (\$)
<b>Costo de inversión</b>				
Volteadora	und	1	32.000.000,00	32.000.000,00
<b>Costos de operación</b>				
Máquina Volteadora	Hora	51	1.377,61	70.258,11
Tamizadora	Hora	0	988,28	0,00
Operario volteadora	Hora	51	2.000,00	102.000,00
Operario tamizadora	Hora	0	2.000,00	0,00
Aplicación compost	m <sup>3</sup>	1020	15.891,00	16.208.820,00
Disposición ceniza	m <sup>3</sup>	285	10.380,00	2.958.300,00
Biomasa para secado	m <sup>3</sup>	546	500,00	273.000,00
Total				19.612.378,1

El escenario 1<sub>b</sub>, proceso sin tamizar, tiene un costo total de inversión de \$32.000.000,00 y un costo de operación anual constante de \$235.348.537,3. En la Figura 19 se muestra el flujo de caja relacionado a los costos de este escenario y se determinó un VAC de \$1.478.114.880,67 para un período de 10 años y una tasa de descuento del 10%.

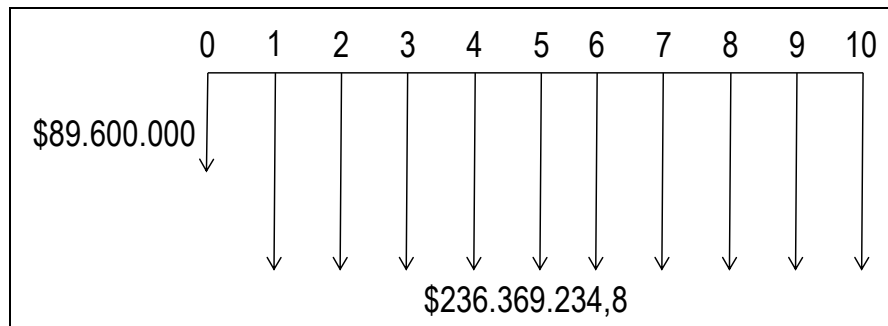
**Figura 19.** Flujo de costos escenario E<sub>1b</sub> (Sin tamizar).

El costo de inversión y los costos de operación para el proceso de compostaje, considerando el tamizado del compost se muestran en la tabla 26.

**Tabla 26.** Costos de inversión y operación del escenario E<sub>1b</sub>. (tamizado).

Ítem	Unidad de medida	Total	Costo unitario (\$)	Costo total (\$)
<b>Costo de inversión</b>				
Volteadora	und	1	32.000.000,00	32.000.000,00
Tamizadora	Und	1	57.600.000,00	57.600.000,00
<b>Costos de operación</b>				
Máquina Volteadora	Hora	51	1.377,61	70.258,11
Tamizadora	Hora	29	988,28	28.660,12
Operario volteadora	Hora	51	2.000,00	102.000,00
Operario tamizadora	Hora	29	2.000,00	58.000,00
Aplicación compost	m <sup>3</sup>	918	15.891,00	14.587.938,00
Disposición ceniza	m <sup>3</sup>	285	10.380,00	2.958.300,00
Disposición piedras	m <sup>3</sup>	156	10.380,00	1.619.280,00
Biomasa para secado	m <sup>3</sup>	546	500,00	273.000,00
Total				19.697.436,23

El escenario 1<sub>b</sub>, proceso tamizado, tiene un costo total de inversión de \$89.600.000,00 y un costo de operación anual constante de \$236.369.234,8. En la Figura 20 se muestra el flujo de caja relacionado a los costos de este escenario y se determinó un VAC de \$1.541.986.624,95 para un período de 10 años y una tasa de descuento del 10%.



**Figura 20.** Flujo de costos escenario E<sub>1b</sub> (Tamizado).

Es importante mencionar que debido a la cantidad reducida de compost (10%) por la separación de las piedras y el costo de aplicación del mismo, no resulta económicamente más viable realizar el tamizado del compost, ya que el costo de operación total aumenta en comparación al proceso sin tamizado. Sin embargo, tamizando, la calidad del producto final puede mejorar.

6.4.3 Escenario 2: *Elaboración de compost con lodos de preparación de la madera y del tratamiento de efluentes y corteza sucia tamizada para la producción de energía.*

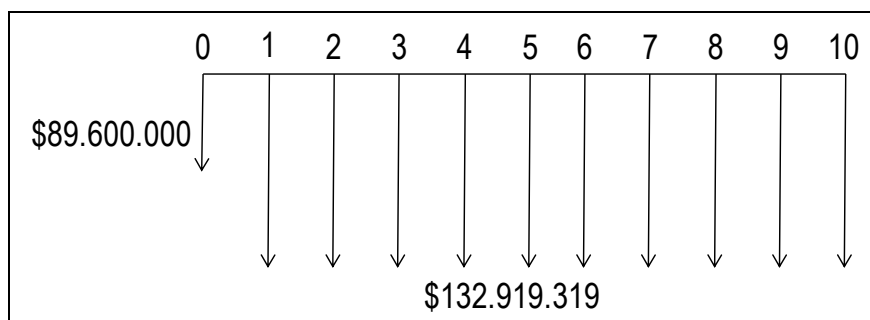
a) *Proceso de compostaje considerando una relación C:N de 30:1*

Los costos de inversión y operación para el escenario 2<sub>a</sub>, se presenta en las Tabla 27.

**Tabla 27.** Costo de inversión y operación del escenario E<sub>2a</sub>.

Ítem	Unidad de medida	Total	Costo unitario (\$)	Costo total (\$)
<b>Costo de inversión</b>				
Volteadora	und	1	32.000.000,00	32.000.000,00
Tamizadora	Und	1	57.600.000,00	57.600.000,00
<b>Costos de operación</b>				
Máquina Volteadora	Hora	12	1.377,61	16.531,32
Tamizadora	Hora	45	988,28	44.472,60
Operario volteadora	Hora	12	2.000,00	24.000,00
Operario tamizadora	Hora	45	2.000,00	90.000,00
Aplicación compost	m <sup>3</sup>	246	15.891,00	3.909.186,00
Disposición ceniza	m <sup>3</sup>	503	10.380,00	5.221.140,00
Disposición piedras	m <sup>3</sup>	156	10.380,00	1.619.280,00
Biomasa para secado	m <sup>3</sup>	304	500,00	152.000,00
Total				11.076.609,92

El escenario 2<sub>a</sub>, tiene un costo total de inversión de \$89.600.000,00 y un costo de operación anual constante de \$132.919.319. En la Figura 21 se muestra el flujo de caja relacionado a los costos de este escenario y se determinó un VAC de \$906.331.675,24 para un período de 10 años y una tasa de descuento del 10%.

**Figura 21.** Flujo de costos escenario E<sub>2a</sub>.

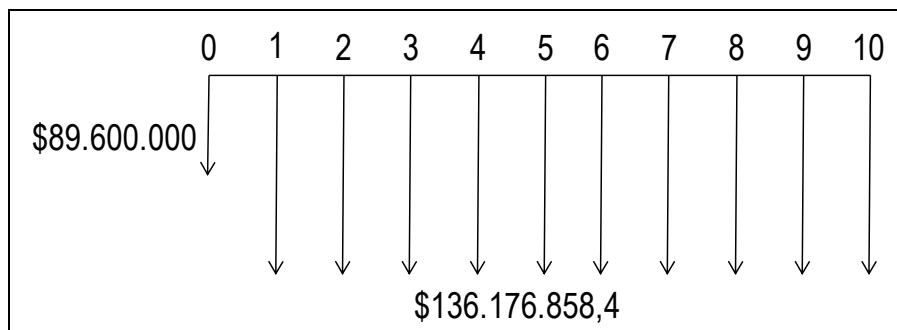
b) Proceso de compostaje considerando una relación C:N de 25:1

Los costos de inversión y operación para el escenario 2, se presenta en la Tabla 28.

**Tabla 28.** Costo de inversión y operación del escenario E<sub>2b</sub>.

Ítem	Unidad de medida	Total	Costo unitario (\$)	Costo total (\$)
<b>Costo de inversión</b>				
Volteadora	und	1	32.000.000,00	32.000.000,00
Tamizadora	und	1	57.600.000,00	57.600.000,00
<b>Costos de operación</b>				
Máquina Volteadora	Hora	13	1.377,61	17.908,93
Tamizadora	Hora	45	988,28	44.472,60
Operario volteadora	Hora	13	2.000,00	26.000,00
Operario tamizadora	Hora	45	2.000,00	90.000,00
Aplicación compost	m <sup>3</sup>	270	15.891,00	4.290.570,00
Disposición ceniza	m <sup>3</sup>	493	10.380,00	5.117.340,00
Disposición piedras	m <sup>3</sup>	156	10.380,00	1.619.280,00
Biomasa para secado	m <sup>3</sup>	285	500,00	142.500,00
Total				11.348.071,5

El escenario 2<sub>b</sub>, tiene un costo total de inversión de \$89.600.000,00 y un costo de operación anual constante de \$136.176.858,4. En la Figura 22 se muestra el flujo de caja relacionado a los costos de este escenario y se determinó un VAC de \$926.347.845 para un período de 10 años y una tasa de descuento del 10%.



**Figura 22.** Flujo de costos escenario E<sub>2b</sub>.

6.4.4 Escenario 3: Producción de energía mediante la quema de lodo de preparación de la madera y corteza tamizada.

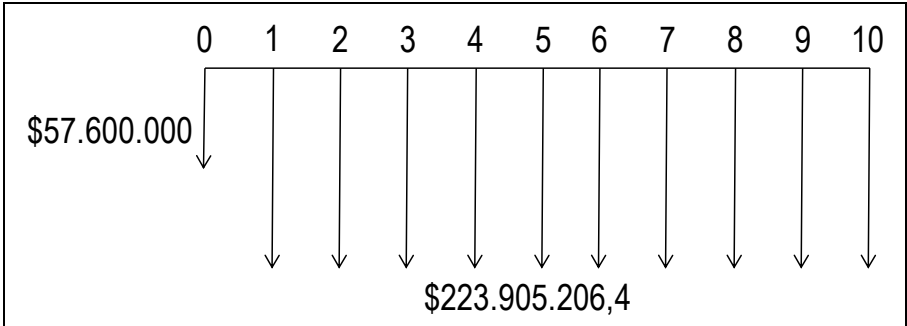
Los costos de inversión y operación para el escenario E<sub>3</sub>, se presenta en la tabla 29.

**Tabla 29.** Costo de inversión y operación escenario E<sub>3</sub>.

Ítem	Unidad de medida	Total	Costo unitario (\$)	Costo total (\$)
<b>Costo de inversión</b>				
Tamizadora	und	1	57.600.000,00	57.600.000,00
<b>Costos de operación</b>				
Tamizadora	Hora	45	988,28	44.472,60
Operario tamizadora	Hora	45	2.000,00	90.000,00
Disposición LPM	m <sup>3</sup>	1097	10.380,00	11.383.434,60
Disposición ceniza	m <sup>3</sup>	516	10.380,00	5.356.080,00
Disposición piedras	m <sup>3</sup>	156	10.380,00	1.619.280,00
Biomasa para secado	m <sup>3</sup>	331	500,00	165.500,00
<b>Total</b>				<b>18.658.767,2</b>

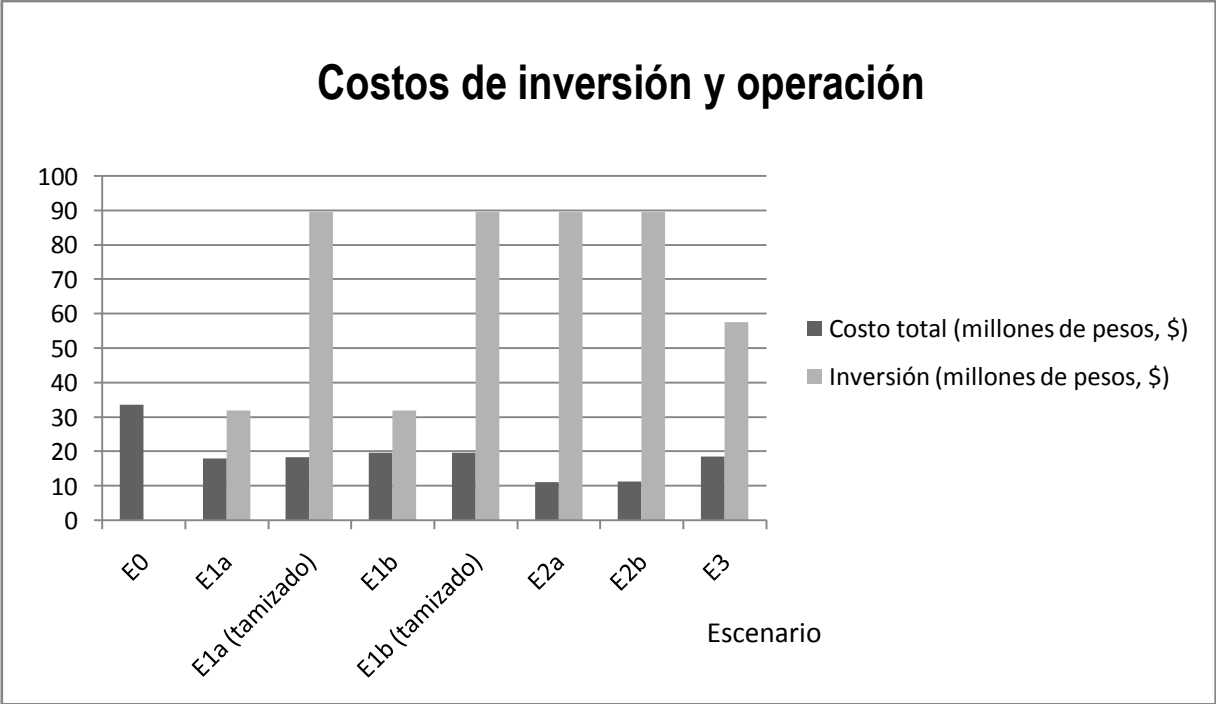


El escenario 3, tiene un costo total de inversión de \$57.600.000,00 y un costo de operación anual constante de \$223.905.206,4. En la Figura 23 se muestra el flujo de caja relacionado a los costos de este escenario y se determinó un VAC de \$1.433.400.566,04 para un período de 10 años y una tasa de descuento del 10%.

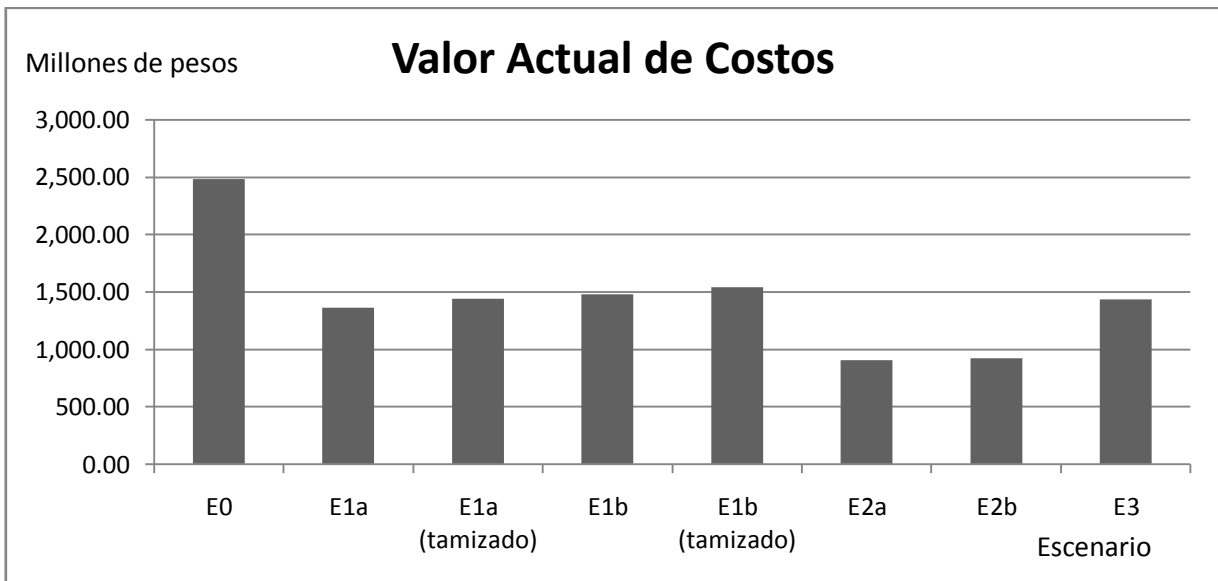


**Figura 23.** Flujo de costos escenario E<sub>3</sub>.

En las figuras 24 y 25 se muestran los costos de inversión y operación mensuales y el VAC de cada escenario estudiado respectivamente.



**Figura 24.** Gráfico Costos vs. Escenario



**Figura 25.** Gráfico VAC vs Escenario.

Analizando únicamente los costos de inversión y operación, el escenario que presenta un mayor VAC es la situación actual, lo que indica que cualquiera de las opciones analizadas representa una mejora económica para la empresa, además de ser soluciones con un menor impacto ambiental. En la Tabla 30 se muestra un resumen de los costos de inversión y operación y el VAC de cada escenario estudiado.

**Tabla 30.** Resumen costos de inversión y operación y VAC (Miles de pesos).

Ítem	Escenario							
	E <sub>0</sub>	E <sub>1a</sub>	E <sub>1a</sub> (tamizado)	E <sub>1b</sub>	E <sub>1b</sub> (tamizado)	E <sub>2a</sub>	E <sub>2b</sub>	E <sub>3</sub>
Inversión	-	32.000	89.600	32.000	89.600	89.600	89.600	57.600
Operación mensual	33.666	18.025	18.337	19.612	19.697	11.077	11.348	18.659
Operación anual	403.992	216.303	220.044	235.344	236.364	132.924	136.176	223.908
VAC <sup>1</sup>	2.482.363	1.361.094	1.441.660	1.478.115	1.541.987	906.331	926.348	1.433.400

<sup>1</sup>Valor actual de costos para un período de 10 años y una tasa de descuento de 10%

## 6.5 Beneficios de cada alternativa

### 6.5.1 Escenario E<sub>1</sub>

El escenario E<sub>1</sub>, permite la utilización de la totalidad de corteza sucia y de lodo de preparación de la madera en el proceso de compostaje, lo que alargaría la vida útil del relleno en el que se disponen actualmente.

En relación a la pérdida de calor en la caldera debido a la humedad presentada en el lodo de tratamiento de efluentes, ésta se reduciría un 30.85% si se realiza un proceso de compostaje con una relación C/N de 30 y un 44.78% con una relación C/N de 25, esto se debe a la utilización de una mayor cantidad de lodo de tratamiento de efluentes en el compostaje para alcanzar dicha relación.

### 6.5.2 Escenario $E_2$

El escenario  $E_2$ , utiliza la totalidad del lodo de preparación de la madera para el proceso de compostaje y la totalidad de la corteza sucia, previamente tamizada, para la generación de energía en la caldera, lo que alargaría, de igual forma que el escenario  $E_1$ , la vida útil del relleno.

En relación a la pérdida de calor en la caldera, el escenario  $E_2$ , presenta mejores resultados que el escenario  $E_1$ , ya que el calor perdido en el proceso de generación de energía en la caldera se reduciría un 69.11% en caso de una relación C/N de 30 y un 71.1% para una relación C/N de 25, esto debido a la utilización de la corteza sucia como combustible en la caldera, lo que ayuda al secado del lodo de tratamiento de efluentes que aún son quemados en la caldera.

Los escenarios  $E_1$  y  $E_2$ , además de los beneficios mencionados, aportarían un material que ayuda al mejoramiento de los suelos, al aportar nutrientes que evitan la posible desertificación y erosión de los suelos y garantiza la fertilidad de la tierra.

El escenario  $E_2$ , presenta cantidades de compost con un manejo de mayor facilidad, en comparación con el escenario  $E_1$ , evitando así posibles costos relacionados al almacenamiento del producto.

### 6.5.3 Escenario $E_3$

El escenario  $E_3$ , presenta una menor pérdida de calor en la caldera en relación a la situación actual y al escenario  $E_1$ , dicha pérdida se reduciría en un 66.23% debido a la utilización, al igual que en el Escenario  $E_2$ , de la totalidad de corteza sucia, previamente tamizada, como combustible en la caldera para el secado de los lodos de tratamiento de efluentes, sin embargo la pérdida es mayor que en el

escenario E<sub>2</sub> debido a que no se analiza el proceso de compostaje como alternativa de destinación, por lo que se hace inevitable la utilización del lodo de tratamiento de efluentes en el proceso de generación de energía en la caldera de poder.

Cabe mencionar que en relación a costos, cualquier alternativa sugiere una mejor solución para la destinación de los residuos que la situación actual, además de contribuir con la mitigación de gases que tienen un alto potencial para favorecer el efecto invernadero, como es el caso del metano, gas que se comúnmente se genera en los rellenos, beneficiando a las poblaciones cercanas a los rellenos utilizados para la disposición de los residuos y a largo plazo ayudaría a escala mundial con la reducción y control del efecto invernadero.

## **6.6 Potencial de uso y demanda de compost en la región del Bío-Bío**

El análisis del potencial del uso del compost proveniente de los residuos estudiados y su demanda (mercado) se realizó en la región del Bío-Bío, debido a la ubicación de la planta Nueva Aldea de la Celulosa Arauco & Constitución S.A., para las actividades agrícola y forestal.

### *6.6.1 Uso agrícola*

Debido a que el sector agrícola es un mercado potencial para productos mejoradores del suelo, como es el caso de compost, en la Tabla 31 se muestra el número de explotaciones agropecuarias para el año 2007 para la región del Bío-Bío, dado por el INE (2007). En la VIII Región de Chile se ubica el 20,5% del total de explotaciones agropecuarias del país, convirtiéndose en la principal región en relación a la actividad agropecuaria (INE, 2007).

**Tabla 31.** Número de explotaciones agropecuarias en la VIII Región.

<b>Provincia</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Cantidad (%)</b>	<b>Superficie (ha)</b>	<b>Superficie (%)</b>
Concepción	4.416	8	77.535,15	4
Arauco	5.541	10	151.852,46	8
Bío-Bío	17.213	30	793.602,42	44
Ñuble	30.397	53	767.910,98	43
Región del Bío-Bío	57.567	100	1.790.901,01	100

Fuente: (INE, 2007)

La situación actual del compost, para la utilización en suelos, se analizó en base a estudios realizados por Hermosilla (2005), en la VIII región, en los cuales la encuesta realizada estableció una demanda de compost de 218 kg/mes por explotación agrícola. Además, indican que el 8% de los agricultores utilizan compost y que la principal causa por las cuales el otro 91% no lo utiliza es por la falta de información de su existencia y/o beneficios, por lo que el 51% de aquellos que no utilizan compost estarían dispuestos a incorporarlo en sus actividades agrícolas en caso de conocer sus beneficios en el suelo.

Según el número de explotaciones agropecuarias para el año 2007, dado por el VII Censo Agropecuario y Forestal (INE, 2007) se puede determinar una demanda real y una demanda potencial para las provincias de la región del Bío-Bío, presentadas en las tablas 32 y 33.

**Tabla 32.** Demanda de compost para la actividad agropecuaria en la VIII Región.

Demanda Región Bío-Bío	Demanda	
	Real	Potencial
Explotaciones con utilización de compost	4.605	29.359
Compost demandado/explotación (kg/mes)	218	218
Compost total demandado (kg/mes)	1.003.968	5.120.239

Fuente: INE, 2007.

**Tabla 33.** Demanda mensual de compost por provincias en la VIII Región.

Provincias	Demanda (t/mes)	
	Real	Potencial
Concepción	125,25	638,78
Arauco	239,73	1222,64
Bío-Bío	372,45	1899,50
Ñuble	266,53	1359,32
Región Bío-Bío	1003,97	5120,24

Fuente: Hermsilla, 2005; INE, 2007.

### 6.6.2 *Uso forestal*

En relación al uso forestal del suelo, para el año 2007, Chile contaba con 20.785 explotaciones forestales y con 6.657.842 hectáreas de plantaciones forestales, de las cuales el 25% (primer lugar a nivel nacional) del total de explotaciones y el 20% (segundo lugar a nivel nacional) de las hectáreas destinadas a esta actividad se encuentran ubicadas en la VIII Región, lo que la convierte en una de las principales regiones de la actividad forestal del país, siendo un mercado potencial para el compost. En la Tabla 34 se muestra el número de explotaciones forestales por provincia en la región del Bío-Bío (INE, 2007).

**Tabla 34.** Número de explotaciones forestales por provincia para la VIII Región.

	<b>Cantidad</b>	<b>Cantidad (%)</b>	<b>Superficie (ha)</b>	<b>Superficie (%)</b>
Concepción	878	17	165.944,85	12
Arauco	810	16	317.624,59	24
Bío-Bío	1.608	31	493.463,20	37
Ñuble	1.929	37	353.130,60	27
VIII del Bío-Bío	5.225	100	1.330.163,24	100

Fuente: (INE, 2007)

En la VIII Región de Chile, la provincia que cuenta con mayor cantidad de área forestal es la provincia del Bío-Bío con un 37% del total de las plantaciones de la Región seguido de la provincia de Ñuble con un 27%.

La empresa Arauco & Constitución S.A. cuenta con aproximadamente 930 mil hectáreas de plantaciones forestales en Chile, en su mayoría de pino radiata y principalmente ubicadas en la Región del Bío-Bío.





## 7 Conclusiones

De acuerdo al estudio bibliográfico es posible realizar una adecuada mezcla de residuos corteza sucia, lodo de preparación de la madera y lodos generados en el tratamiento de efluente de la Celulosa Arauco y Constitución S.A. – Planta Nueva Aldea para la elaboración de compost.

Los escenarios que presentan mejores resultados en relación a la combustión de los residuos son aquellos en los cuales se utiliza la mayor cantidad posible de LTE para el proceso de compostaje, debido a que la humedad presentada en estos lodos es un factor que limita el proceso de combustión. Por lo tanto, para mejorar su eficiencia, en el caso de los lodos (LPM y LTE) resulta necesario un secado previo y consecuentemente este proceso demanda energía complementaria.

Los escenarios  $E_{1a}$  y  $E_{1b}$ , presentan costos de operación y VAC menores a la disposición actual, sin embargo, la cantidad de compost generado, es demasiado alta, por lo que se necesitaría de grandes áreas a los cuales se les podría aplicar el compost, en el caso de utilizarlo en plantaciones propias de la empresa.

El escenario  $E_2$  que contempla los costos de adquisición y operación de una tamizadora y una máquina volteadora, resulta técnica y económicamente factible, en relación a un gasto de consumo de biomasa en la caldera de poder para el secado del LTE, y en relación a la disposición de LPM en el vertedero ( $E_3$ ). El manejo de la cantidad de compost producido es de mayor facilidad en este escenario comparado con los otros que considera la producción de compost.

La generación de energía por medio de la combustión de los residuos depende de su contenido de humedad y de materia inerte, tornando en este estudio una

alternativa de destinación, que únicamente permite la eliminación de dichos residuos, sin embargo no presenta ningún beneficio económico.

La Región del Bío-Bío, es una de las principales regiones para la actividad agropecuaria y forestal de Chile, por lo tanto, existe potencial para la utilización de compost, debido a sus beneficios para el mejoramiento de los suelos, sin embargo, la aplicación agrícola y forestal del compost debe de ser establecida según las necesidades de los suelos y cultivos y el objetivo principal ha de ser el de mantener la fertilidad y la calidad del suelo.

## 8 Consideraciones Finales

Investigaciones experimentales envolviendo el compostaje de los residuos serian necesarios para la obtención de datos más definidos y directamente relacionados a los factores que interfieren en el proceso y cuyos valores fueran asumidos en este estudio, como: frecuencia de los volteos, tiempo de compostaje, reducción de volumen del material durante el proceso, características del composta final, y otros.

Teniendo en cuenta el buen desempeño del escenario E<sub>2</sub>, que contempla el compostaje de los lodos LPM y LTE a relaciones C:N de 30:1 y C:N de 25:1 junto a la combustión de la CS tamizada, se considera importante un estudio más detallado de la factibilidad técnica de estas alternativas y la determinación de sus parámetros técnicos través de investigación con las mezclas sugeridas para el compostaje, como de otras que permiten un mayor contenido de LTE.



## 9 Referencias

Arauco & Consitutción S.A., 2007. Manual de fundamentos y operaciones.

Arauco & Constitución S.A., 2008. Análisis realizados por Paneles a Lodos de Efluentes. Informe Interno Industria de Celulosa Arauco & Constitución S.A.-Planta Nueva Aldea.

ASTM-AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL, 2004. ASTM D 5865 - Standard test method for gross calorific value of coal and coke. West Conshohocken, PA.

ASTM-AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL, 2010. ASTM D 3174-04 - Standard test method for ash in the analysis sample of coal and coke from coal. West Conshohocken, PA.

ATCP-Asociación Técnica de la Celulosa y el Papel. 2007. Producción de pulpa 2006-2007. En: <http://www.atcp.cl/PDFs/ProdPulpa2006.pdf>. Acceso el 10/05/2011.

Barbosa, L., Silva, E., Edgardo, O., 2008. BIOMASSA para energía. Campinas, Brasil. Editora da UNICAMP. 733 pp. ISBN: 978-85-268-0783-9

BRACELPA. 2011. Publicación mensual.

Bureau Veritas Formación, 2008. Manual para la formación en Medio Ambiente. Valladolid. Lex Nova press. 806 pp. ISBN: 9788498980271.

CMPC-Compañía Manufacturera de Papeles y Cartones, 2011. La Celulosa en Chile. En: <http://www.papelnet.cl/celulosa/index.htm>. Acceso el 14 de marzo de 2011.

CNE.-Comisión Nacional de la Energía, 2008. Evolución precio a público petróleo diesel. En: [http://anuario.cne.cl/anuario/hidrocar/php\\_hidrocar-5.3.php](http://anuario.cne.cl/anuario/hidrocar/php_hidrocar-5.3.php). Acceso el 13/05/2010.

CORMA-Corporación Chilena de la Madera, 2009. Producción de Celulosa 1970-2009. Estadística y mercado, Instituto Forestal-Sede metropolitana. Chile.

CPTS-Centro de Promoción de Tecnologías Sostenibles, 2005. Guía Técnica General de Producción Más Limpia. Anexos. En: <http://www.cpts.org/prodlimp/guias/GuiagraIPML/cap7.pdf>.

Crovara, C., 2008. El conflicto entre Argentina y Uruguay por las papeleras en la agenda mediática. Tesis para optar al grado académico de Licenciado en Periodismo. Universidad del Salvador, Facultad de Ciencias de la Educación y la Comunicación Social. Argentina. 152 pp.

Dalzell, H., Biddlestone, A., Gray, K., & Thurairajan, K., 1991 Manejo del suelo: producción y uso del composte en ambientes tropicales y subtropicales. FAO. 177 pp. ISBN: 92-5-302553-0.

Davis, W.T., 2000. Air Pollution Engineering Manual. Canadá: Jhon Wiley & Sons, Inc. 856 pp.

Diocaretz, M., 2010. Aspectos técnicos y económicos de procesos de higienización de lodos provenientes del tratamiento de aguas servidas. Tesis para optar al título de Ingeniero Ambiental. Universidad de Concepción, Centro de Ciencias Ambientales EULA-Chile. 119 pp.

Grupo Emison, 2001. Barcelona España. Plantas de compostaje. En: <http://www.emison.com/5145.htm>. Acceso el 05 de abril de 2011.

García, R., 2001. Combustión y Combustibles. En: <http://www.energia.inf.cu/iee-mep/SyT/CDG/Taller1BURE/COMBUSTION.PDF>.

Guerrero, J. & Monsalve, J., 2006. El compostaje como una estrategia de producción más limpia en los centros de beneficio animal del departamento de Risaralda. Colombia. *Scientia Et Technica*, Universidad Tecnológica de Pereira. 32: 469-476. ISSN: 0122-1701.

Hagelqvist, A. 2009. Forest industry sludge as a resource for energy recovery. *Karlstad University Studies* 2009:26. ISBN 978-91-7063-249-5.

Hermosilla, C., 2005. Evaluación económica de una planta de compostaje en la VIII región de Chile. Tesis para optar al grado de Magíster en Ingeniería Agrícola, con mención en Agroindustrias. Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería Agrícola. Chillán. 157 pp.

INDAP-Instituto de Desarrollo Agropecuario, 2011. Tabla de Costos 2011. Ministerio de Agricultura, Chile.

INE-Instituto Nacional de Estadística, 2007. VII Censo Agropecuario y Forestal. En:

[http://www.ine.cl/canales/chile\\_estadistico/censos\\_agropecuarios/censo\\_agropecuario\\_07.php](http://www.ine.cl/canales/chile_estadistico/censos_agropecuarios/censo_agropecuario_07.php). Acceso el 4 de julio de 2011.

INIA-Instituto Nacional de Investigación Agraria, 2005. Métodos de análisis de compost. Santiago, Chile.

INIA-Instituto Nacional de Investigación Agraria, 2008. Preparación y uso del Compost, Folleto 6. ISBN: 978-9972-44-019-9.

INN-Instituto Nacional de Normalización, 2004. Norma Chilena Oficial. Compost-Clasificación y Requisitos. Instituto Nacional de normalización. Santiago, Chile. 23 pp.

INTEC-Corporación de Investigación Tecnológica de Chile, 1999. Manual de compostaje. Santiago, CL. 82 pp.

Levy, J. & Taylor, B., 2003. Effects of pulp mill solids and three composts on early growth of tomatoes. *Bioresource Technology*, 89(3): 297-305.

Luraschi, M., 2007. Análisis de la cadena productiva de la celulosa y el papel a la luz de los objetivos de desarrollo sostenible: Estudio de Caso Chile. Santiago de Chile. 85 pp.



Mahmood, T., & Elliott, A., 2006. A review of secondary sludge reduction technologies for the pulp and paper industry. *Water Research*, 40: 2093-2112.

Marche, T., Schnitzer, M., Dinel, H., Paré, T., Champagne, P., Schulten, H.R. & Facey, G., 2003. Chemical changes during composting of a paper mill sludge–hardwood sawdust mixture. *Geoderma*, 116(3-4): 345-356.

Masters, G.M. 1998., Introduction to environmental engineering and science. New Jersey. Prentice-Hall, Inc. 651 pp.

Modolo, R., Benta, A., Ferreira, V.M., & Machado, L.M., 2010. Pulp and paper wastes valorization in bituminous mixes. *Waste Management*, 30: 685-696.

Modolo, R., Ferreira, V., Machado, L., Rodríguez, M., & Coelho, I., 2011. Construction materials as a waste management solution for cellulose sludge. *Waste Management*, 31: 370–377.

Monte, M.C., Fuente, E., Blanco, A., & Negro, C., 2009. Waste management from pulp and paper production in the European Union. *Waste Management*, 29: 293-308.

Mora, J., 2006. Contribuciones del compost al mejoramiento de la fertilidad del suelo. En: [http://lunazul.ucaldas.edu.co/downloads/5c04e9a4Revista9\\_10\\_9.pdf](http://lunazul.ucaldas.edu.co/downloads/5c04e9a4Revista9_10_9.pdf).

Moreno, J., & Moral, H., 2008. Compostaje. Madrid. Ediciones Mundi-Prensa. 570 pp. ISBN 978-84-8476-.346

Naciones Unidas., 2005. La inversión extranjera en América Latina y el Caribe. Santiago de Chile. 183 pp.

Nurmesniemi, H., Pöykiö, R., & Keiski, R.L., 2007. A case study of waste management at the Northern Finnish pulp and paper mill complex of Stora Enso Veitsiluoto. *Waste Management*, 27: 1939-1948.

OPS-Organización Panamericana de la Salud, 1999. Uruguay. Manual para la elaboración de compost, Bases conceptuales y procedimientos. 67 pp.

Oral, J., Sikula, J., Puchyr, R., Hajny, Z., Stehlik, P., & Bebar, L., 2005. Processing of waste from pulp and paper plant. *Journal of Cleaner Production*, 13: 509-515.

Ramalho, R., 1996. Tratamiento de aguas residuales. Barcelona, España. Editorial Reverté, S.A. 705 pp. ISBN: 84-291-7975-5.

Rodrigues, V. A. J. , Silva, C. M., Carneiro, A. C., Rezende, A. A. P., Santos, L. S. & Ikawa, G. A., 2010. The use of pulp mill solid wastes for energy production. In: Third International Symposium on Energy from Biomass and Waste, Venice, Italy; 8-11. CISA, Environmental Sanitary Engineering Centre, Italy.

Rodríguez, M., & Córdova, A., 2006. Manual de compostaje municipal, tratamiento de residuos sólidos urbanos. México. 101 pp.

Sapag, N., & Sapag, R., 1991. Preparación y evaluación de proyectos. México. McGraw-Hill Interamericana de México S.A. 385 pp.

Soliva, M., & Paulet, S., Aplicación agrícola de residuos orgánicos. España. Universidad de Lleida. ISBN: 84-8409-093-0.

Stoica, A., Sandberg., & Holby, O., 2009. Energy use and recovery strategies within wastewater treatment and sludge handling at pulp and paper mills. *Bioresource Technology*, 100(14): 3497-3505

Tucker, P., 2005. Co-composting paper mill sludge with fruit and vegetable wastes. University of Paisley, 168 pp.

Varela, S., & Basil, G., 2011. Uso de compost en la producción de plantines de especies forestales. Silvicultura y Vivera, Cuadernillo No. 4. ISSN: 1853-4775. 11 pp.

Wang, J., Xu, Y., & Li, Z., 2009. Research on Project selection of pre-evaluation of zengineering design Project bidding. *International Journal of Project Management*, 27(6): 584-599.

Xavier, C., 2006. Influencia de la tecnología de tratamiento en la eliminación de fitoesteroles contenidos en efluentes de celulosa Kraft y en la toxicidad de estos compuestos en organismo acuáticos. Tesis para optar al grado de Doctor en Ciencias Ambientales. Universidad de Concepción, Escuela de Graduados. Concepción. 163 pp.

Yamada, Y., & Kawase, Y. 2006. Aerobic composting of waste activated sludge: kinetic analysis for microbiological reaction and oxygen consumption. *Waste Management*, 26(1): 49-61.

Zambrano, M. A., 2007. Optimización del proceso de compostaje aeróbico de residuos sólidos provenientes de la industria de celulosa Kraft y su efecto en el crecimiento en vivero de plantas de pinus radiata D. Don. Tesis para optar al grado académico de doctor en ciencias forestales. Universidad de Concepción, Facultad de Ciencias Forestales. 99 pp.

Zambrano, M., Arias, M., Gallardo, F., & Vidal, G. 2005. Utilización de Dregs y Grits provenientes del proceso de fabricación de celulosa Kraft en la productividad vegetal. *Afinidad*, 62(517):225-232.

Zambrano, M., Parodi, V., Baeza, J., & Vidal, G., 2007. Acid Soils' Ph and Nutrient Improvement when Amended with Inorganic Solid Wastes from Kraft Mill. *Journal of the Chilean Chemical Society*, 52(2): 1088–1091.

Zambrano, M., Pichún, C., Alvear, M., Villarroel, M., Velásquez, I., Baeza, J. & Vidal., G., 2010. Green liquor dregs effect on Kraft mill secondary sludge composting. *Bioresource Technology*, 101: 1028–1035.

Zaror, C., 2002. Introducción a la ingeniería ambiental para la Industria de procesos. Concepción. Universidad de Concepción. 613 pp. ISBN: 956-227-252-4.

Zhang, L., Champagne, P., & Xu, C. (2010). Bio-crude production from secondary pulp/paper-mill sludge and waste newspaper via co-liquefaction in hot-compressed water. *Energy*, 36(4): 2142-2150.

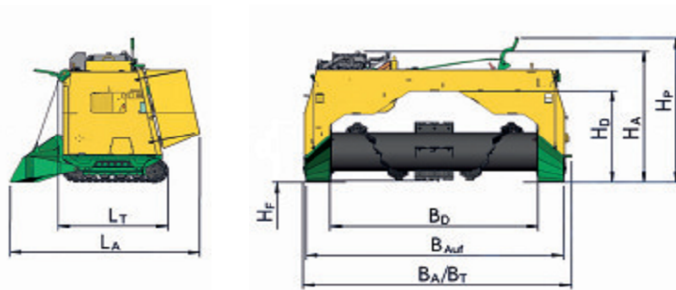


## 10 Anexos

### Anexo 1. Especificaciones técnicas de máquina volteadora Backhus 14.28.



#### Dados técnicos / Características técnicas



			14.28	
<b>Dados operacionais / Datos del trabajo</b>				
Langura de leiras até / Ancho de pila hasta	BAuf	m (ft)	2,8 (9.2)	
Altura de leiras até / Altura de pila hasta		m (ft)	1,2 (3.9)	
Secção de leiras a 45° / Sección recta de la pila a 45°		m² (yd²)	1,9 (2.3)	
Capacidade de revolvimento até / Capacidad de volteo		m³/h (yd³/h)	500 (700)	
Velocidade de avanço / Velocidad avance		m/min (ft./min)	0-40 (0-130)	
<b>Dimensões operacionais / Dimensiones de trabajo</b>				
Langura de operação / Ancho de paso	BD	mm (ft)	2.275 (7.5)	
Altura de operação / Altura de paso	HD	mm (ft)	1.100 (3.6)	
Comprimento / Longitud	LA	mm (ft)	2.100 (6.9)	
Langura / Anchura	BA	mm (ft)	2.950 (9.7)	
Altura até / Altura	HA	mm (ft)	1.650 (5.4)	
<b>Dimensões de transporte / Dimensiones de transporte</b>				
Comprimento / Longitud	LT	mm (ft)	1.200 (3.9)	
Langura / Anchura	BT	mm (ft)	2.950 (9.7)	
Altura / Altura	HP	mm (ft)	1.750 (5.7)	
Altura máxima do chão / Altura libre sobre el suelo	HF	mm (inch)	20-100 (0.8-3.9)	
			<b>BACKHUS 14.28</b>	<b>BACKHUS 14.28 D</b>
Motor / Motor			Briggs & Stratton V-Twin 0.90 lt.; 2 cylinders	Cummins A1400; 1.46 lt.; 3 cylinders
Potência / Potencia		kW (HP)	23 (31)	
Peso aproximado / Peso aproximado sin opciones		kg (lbs)	1.250 (2,760)	



BACKHUS GmbH  
Wischenstr. 25  
25188 Edevecht  
Germany

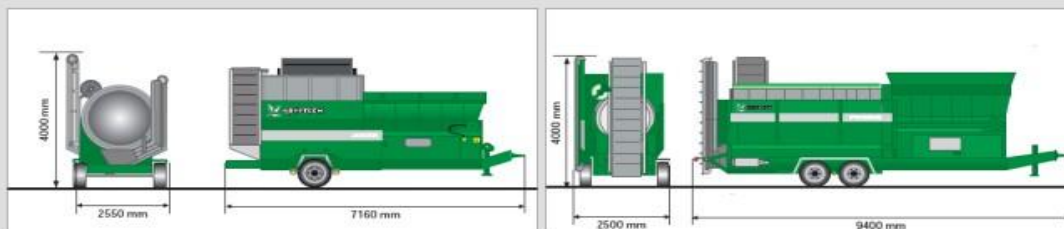
+49 4486 9284-0  
+49 4486 2424  
sales@backhus.com  
www.backhus.com

Find out more:  
www.backhus.com/14.28

Reservado o direito a alterações técnicas / Especificaciones sujetas a cambio sin previo aviso 1760897/ES

## Anexo 2. Ficha técnica de máquina tamizadora Joker.

# Technical Specifications



	JOKER	PRIMUS
<b>Machine dimensions</b> Transport position L x W x H: Operational position L x W x H:	7160 x 2550 x 4000 mm 7050 x 6175 x 3110 mm	9400 x 2500 x 4000 mm 11660 x 4780 x 2975 mm
<b>Feed hopper</b> Capacity: Filling height: Filling width: Filling depth: Belt width:	> 2 m <sup>3</sup> 2270 mm 2635 mm 1136 mm 730 mm	> 3 m <sup>3</sup> 2640 mm 2900 mm 1340 mm 1000 mm
<b>Screening drum</b> Length: Diameter: Screening area: Material thickness: Hole sizes: Cleaning brush diameter:	2440 mm 1800 mm 10 m <sup>2</sup> 6/8/10 mm to 80 mm 500 mm	4000 mm 1450 mm 16 m <sup>2</sup> 6/8/10 mm to 80 mm 500 mm
<b>Discharge conveyors</b> <b>Fine fraction</b> Conveyor length: Conveyor width: Discharge height: <b>Oversized fraction:</b> Conveyor length: Conveyor width: Discharge height:	4150 mm 1600 mm 2420 mm 3400 mm 550 mm 2125 mm	3400 mm 700 mm 2080 mm 3400 mm 700 mm 2300 mm
<b>Drive unit</b> Engine: Power: Cylinders: Tank capacity: Total permissible weight:	Lombardini diesel engine 16,5 kW 3 40 l 5000 kg	Perkins diesel engine 38 kW 4 80 l 9000 kg
<b>Throughput</b>	to 35 m <sup>3</sup> /h	to 70 m <sup>3</sup> /h
<b>Additional equipment</b>	see page 10	see page 10

KOMPTECH GmbH  
A-8130 Frohnleiten, Kühnau 37  
[T] +43 3126 505 - 0  
[F] +43 3126 505 - 505  
info@komptech.com

KOMPTECH Anlagenbau GmbH  
A-1020 Wien, Wehlstraße 150/ Top II  
[T] +43 1 219 91 31 - 0  
[F] +43 1 219 91 31 - 10  
anlagenbau@komptech.com



www.komptech.com

KOMPTECH Vertriebsgesellschaft  
Deutschland mbH  
D-59302 Oelde, Beckumer Straße 51  
[T] +49 2522 93 45 - 0  
[F] +49 2522 93 45 - 45  
info@komptech.de

KOMPTECH UK Ltd.  
Forge End, Lodge Farm,  
Kineton, Warwickshire, CV35 0JH  
[T] +44 1926 64 29 72  
[F] +44 1926 64 29 71  
info.uk@komptech.com

Technical information is subject to change due to continued development. E10405