DISEÑO DE UNA PROPUESTA PARA DISMINUIR LA DISPOSICIÓN DE LODOS RESULTANTES DEL PROCESO DE DESFIBRADO MEDIANTE LA ELABORACIÓN DE UNA ESTRATEGIA PARA SU REUTILIZACIÓN EN LA EMPRESA EMPACOR S.A.

JUAN CARLOS ALVAREZ AGREDO

YESSICA LORENA AVILA MORENO

JHON ALEXANDER GUACHETA JIMENEZ

CESAR AUGUSTO VINASCO MARTINEZ

UNIVERSIDAD DEL BOSQUE

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE PRODUCCIÓN Y PRODUCTIVIDAD

BOGOTÁ D.C

2020

DISEÑO DE UNA PROPUESTA PARA DISMINUIR LA DISPOSICIÓN DE LODOS RESULTANTES DEL PROCESO DE DESFIBRADO MEDIANTE LA ELABORACIÓN DE UNA ESTRATEGIA PARA SU REUTILIZACIÓN EN LA EMPRESA EMPACOR S.A.

JUAN CARLOS ALVAREZ AGREDO

YESSICA LORENA AVILA MORENO

JHON ALEXANDER GUACHETA JIMENEZ

CESAR AUGUSTO VINASCO MARTINEZ

DIRECTOR: KENNETH OCHOA

UNIVERSIDAD DEL BOSQUE

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE PRODUCCIÓN Y PRODUCTIVIDAD

BOGOTÁ D.C

2020

Resumen

Mediante este proyecto se realiza un estudio de investigación para determinar una alternativa viable de disposición de los residuos de lodo para la empresa Empacor S.A.

La presente investigación se desarrolla en 3 fases, en donde inicialmente se hace una recolección de datos secundarios, se revisan documentos, registros públicos y archivos de otros investigadores acerca de los impactos sobre medio ambiente causados por la disposición actual de los lodos papeleros, también se analiza las aplicaciones a nivel mundial y los estudios que se han realizado para su aprovechamiento, al igual que las posibles alternativas aplicables en la ciudad de Bogotá y sus alrededores. Para la elección de la mejor alternativa de reutilización de lodos, se usó el proceso analítico de jerarquización, en donde fueron ponderados las diferentes alternativas de acuerdo a los criterios establecidos por la compañía Empacor S.A. La propuesta seleccionada para dar solución al problema es la reutilización de lodos en la generación de energía, utilizándose como combustible secundario.

Este proyecto mostro que es posible valorizar los residuos de lodos de la Empresa Empacor S.A. al utilizarse en una central termoeléctrica aledaña a la capital. El uso de dichos lodos en aprovechamiento energético significaría para Empacor S.A. un aumento en el margen de utilidad aproximado de $ 215 millones anuales.

Finalmente se plantean las recomendaciones a la empresa Empacor S.A, acerca del tratamiento de estos lodos papeleros y la disminución del impacto en el medio ambiente.

Palabras clave: Alternativa viable, reutilización de lodos papeleros, proceso analítico de jerarquización, aprovechamiento energético, combustible secundario.

Contenido

Introducción 8

1. Planteamiento del problema 9

1.1. Descripción 9

1.2. Definición. 9

1.3. Pregunta de investigación 11

2. Objetivos 12

2.1. Objetivo general 12

2.2. Objetivos específicos 12

3. Justificación 13

4. Marco referencial 14

4.1. Marco geográfico 14

4.2. Marco conceptual 16

4.3. Marco teórico 22

4.4. Marco normativo o legal 35

4.5. Marco histórico 37

5. Diseño metodológico 38

5.1. Fase exploratoria 38

5.2. Fase de análisis 38

5.3. Fase de diseño 39

6. Resultados obtenidos 39

7. Conclusiones 58

7.1. Aprovechamiento Energético 58

7.2. Aprovechamiento como materia prima en Empacor S.A 59

7.3. Compostaje 60

7.4. Recomendaciones 60

8. Bibliografía 64

Listado de tablas

Tabla 1. Matriz de preguntas guía a través del método 5W2H 11
Tabla 2. Definición de residuo 16
Tabla 3. Definición de lodos 17
Tabla 4. Definición de relleno sanitario 19
Tabla 5. Definición de economía circular 20
Tabla 6. Definición de triangulación metodológica 21
Tabla 7. Definición de proceso analítico jerárquico 22
Tabla 8. Escala comparación método AHP 33
Tabla 9. Índice aleatorio por tamaño de matriz 35
Tabla 10. Poder calorífico de los lodos 51
Tabla 11. Composición química de los lodos 51
Tabla 12. Aplicaciones de cocción 52
Tabla 13. Información recolectada de las alternativas por criterio 55
Tabla 14. Comparación pareada por criterios. 56
Tabla 15. Pesos de los criterios 56
Tabla 16. Escala homologación criterio % humedad 57
Tabla 17. Escala homologación criterio grado de requisición de tratamiento previo 57
Tabla 18. Escala homologación criterio % reutilización lodo 57
Tabla 19. Escala homologación criterio % aumento margen de la empresa 58
Tabla 20. Ponderación final alternativas jerárquicamente 58
Tabla 21. Características de equipo rotativo de secado Dingli 62
Tabla 22. Análisis preliminar de inversión equipo rotativo de secado 63

Listado de figuras

Figura 1. Estructura gráfica 5W2H 10
Figura 2. Complejo industrial (Fontibón- Bogotá) 14
Figura 3. Planta corrugadora Bogotá- zona industrial Montevideo 15
Figura 4. Planta corrugadora Guarne- Antioquia 15
Figura 5. Banda trasportadora Hidropulper 24
Figura 6. Imagen de hidropulper seccionado y en proceso de pulpeado 24
Figura 7. Imagen de un desarenador 25
Figura 8. Disco refinador 26
Figura 9. Refinador 27
Figura 10. Mesa de formación 27
Figura 11. Prensa de secado 28
Figura 12. Secadores de papel 28
Figura 13. Pope reel 29
Figura 14. Rebobinadora 29
Figura 15. Patio de almacenamiento de rollos 30
Figura 16. Planta de tratamiento de aguas PTAR 31
Figura 17. Prensa de lodos 32
Figura 18. Contenedor de lodos secos 32
Figura 19. Definición relación de consistencia 34
Figura 20. Definición Índice de consistencia 34
Figura 21. Definición del máximo valor propio de la matriz de comparaciones 34
Figura 22. Composición química de los residuos de lodos de papel seco 43
Figura 23. Esquema interno de ciclo de secado 46
Figura 24. Partes de equipo de secado rotativo 47
Figura 25. Profundidad de las raíces de plantas con y sin fertilización 48
Figura 26. Procedimiento recomendado para lodos de diferentes plantas de tratamiento de aguas residuales. 52
Figura 27. Participación por tecnología en la matriz eléctrica. 53

Listado de anexos

Anexo 1. Tabla de disposición de lodos Empacor S.A. 69
Anexo 2. Especificaciones técnicas de cubeta para huevos 70
Anexo 3. Caracterización realizada por Empacor S.A. 71
Anexo 4. Análisis de peligrosidad de los lodos..... 72
Anexo 5. Cronograma de actividades..... 73

Introducción

En este trabajo se desarrolló un proyecto de investigación en la empresa Empacor S.A, acerca de la disminución y reutilización de los lodos en la compañía o en otros procesos productivos, dichos lodos son el resultante del proceso de fabricación de papel Kraft. La empresa Empacor se encuentra ubicada en la ciudad de Bogotá y tiene como objetivo minimizar el impacto que sus procesos productivos puedan generar sobre el medio ambiente para lo cual trabaja bajo un modelo de economía circular regenerativa.

Se realizó un diagnóstico actual de la empresa identificando como es el proceso productivo, que materias primas se utilizan, como se generan los lodos y la documentación existente en la compañía, para lo cual fue de vital importancia que uno de sus integrantes se encuentra trabajando para la empresa actualmente. Se realizaron entrevistas con los jefes encargados del proceso y con el directo responsable del proceso de tratamiento y disposición de los lodos, en donde es explicado que en la actualidad los lodos generados son dispuestos en rellenos de nivelación topográfico y en rellenos sanitarios.

Luego del levantamiento de toda esta información se procede a investigar a nivel mundial y nacional los posibles usos que este lodo podría tener, encontrando diversas opciones de su uso dentro de uno de los procesos productivos de la compañía y posibles usos en procesos productivos de otras compañías con lo cual se espera la disminución del impacto ambiental y el lineamiento con las políticas ambientales de Empacor.

Finalmente se realizó una evaluación de las propuestas y su viabilidad para generar una serie de recomendaciones a la compañía en cuanto al manejo que se le podrían dar a los lodos y cumplir su objetivo de trabajar bajo un modelo de economía circular regenerativa.

1. Planteamiento del problema

1.1. Descripción

El estudio se centra en la búsqueda de posibles alternativas que permitan la reutilización de los lodos generados en el proceso de fabricación de papel en la planta ubicada en la sede de Fontibón de la empresa Empacor S.A. Esta planta utiliza como materia prima fibras de papel 100 % recicladas, que, por medio de una cadena logística, logra captar de diferentes sitios ubicados en la ciudad de Bogotá. Durante el proceso de la fabricación del papel, las fibras sufren una serie de transformaciones microscópicas requeridas para que estas se puedan entrelazar y formar cadenas resistentes que permitan la creación de una capa uniforme de papel. Las fibras se dividen en dos tipos: fibras largas y fibras cortas (finos). Las fibras largas permiten el correcto entrelazado y formación de una capa de papel, las fibras cortas (finos) son el resultado no aprovechable del proceso de reutilización del papel. Se llaman fibras cortas porque el papel ha sido cortado y reutilizado tantas veces que estas disminuyen su tamaño considerablemente, luego de esto no son capaces de generar los enlaces suficientes para formar una capa de papel.

El proceso inicia con la desintegración del papel en el hidropulper hasta formarse una pasta base llamada pulpa, esta es almacenada y clasificada en tanques para una posterior limpieza profunda.
Luego de la limpieza la pasta es sometida a un proceso de desfibrado donde se forman los enlaces correspondientes para general el papel. La formación del papel inicia cuando se extrae la pulpa del tanque de máquina y es distribuida uniformemente sobre la malla en la mesa de formación, que por medio de cajas de vacío es retirado el exceso de agua. El papel recién formado sobre la malla es comprimido en una prensa para dar forma a una lámina de papel que luego es transportada por una banda hacia una serie de rodillos secadores que retiran por completo el agua y crean una lámina continua de papel que al final de la línea es enrollada en una bobina.

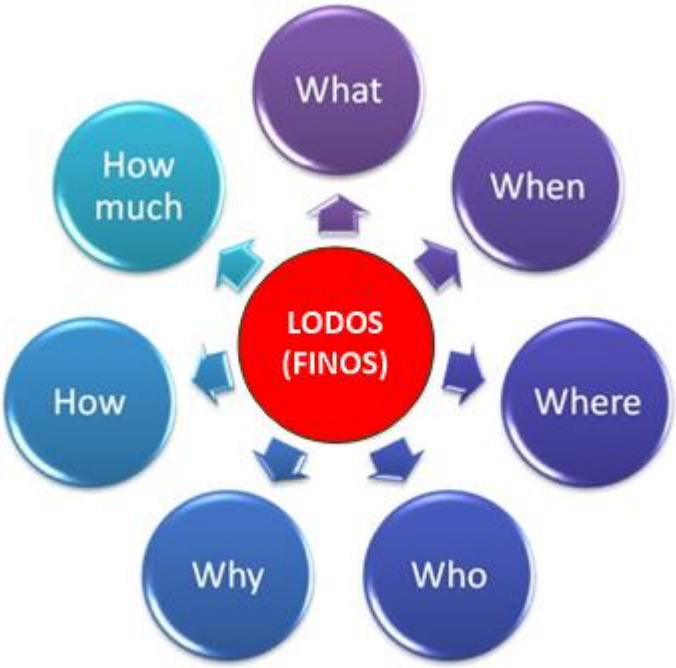
1.2. Definición.

La compañía EMPACOR S.A. produce mensualmente en promedio 638 toneladas de lodos (**ver anexo 1**). La disposición de los lodos tiene un costo aproximado anual de $215 millones de pesos colombianos a la compañía con respecto al año 2019. En la actualidad estos lodos son dispuestos en rellenos de nivelación topográfica.

La compañía se encuentra enfocada en poder solucionar este problema de una manera más amigable y sostenible con el medio ambiente y a su vez con un retorno económico. Todo esto centrado en mejorar su ciclo de economía circular.

En la siguiente figura 1, se muestra la herramienta 5W2H.[1]

Figura 1. *Estructura gráfica 5W2H*



What / ¿Qué?	El proceso de fabricación de papel genera lodos que contienen fibras cortas o partículas finas no aprovechables dentro del ciclo productivo de la organización Empacor S.A.
When / ¿Cuándo?	Al final de la cadena de producción de papel, el agua que ha sido conducida durante todo el proceso se le retiran estas fibras cortas que representan los lodos.
Where / ¿Dónde?	En la PTAR después del tratamiento ocurre la separación del agua para su recirculación y de los lodos para su prensado y disposición final.
Who ¿Quién?	Es un problema no ligado a las personas, es inherente al proceso.

[1] La herramienta 5W2H es una herramienta de gestión que a través de siete cuestionamientos nos permite elaborar un plan de acción de forma sistemática y estructurada.

Why/ ¿Por qué?	Porque las fibras cortas no poseen la capacidad para formar enlaces entre sí, y se dispersan en el agua.
How / ¿Cómo?	La tendencia a resultar fibras cortas surge dependiendo del grado de aprovechamiento del papel reciclado utilizado en el proceso.
How much / ¿Cuánto?	Se generan en promedio 638 ton/mes de lodos y su manejo y disposición cuesta en promedio 17.9 millones de pesos colombianos /mes.

Tabla 1. *Matriz de preguntas guía a través del método 5W2H*

1.3. Pregunta de investigación

- ¿Cuál es la estrategia más viable para la reutilización de lodos resultantes del proceso de desfibrado en Empacor S.A.?

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

Diseñar una propuesta para disminuir la disposición de lodos resultantes del proceso de desfibrado mediante la elaboración de estrategias para su reutilización en la empresa Empacor S.A.

2.2. Objetivos específicos

- Identificar alternativas de utilización de los lodos generados en la empresa Empacor S.A. mediante métodos de recolección de datos cuantitativo.
- Elaborar una propuesta que permita reutilizar los lodos y optimizar los recursos económicos en la empresa Empacor S.A basado en un modelo de economía circular.

3. Justificación

Los lodos resultantes en las industrias papeleras, dadas sus características son actualmente un problema para las empresas fabricantes (Quinchía et al., 2007).

El cumplir con la normatividad ambiental para la disposición de estos lodos, significa para estas compañías un gasto importante que no tiene retorno (Coburn & Dolan, 1995).

A pesar de que se han realizado múltiples investigaciones en torno al tema, en la industria colombiana no hay un panorama claro para el aprovechamiento de estos residuos, por lo que la mayoría de las empresas en la industria papelera colombiana, subcontratan la recolección y disposición en rellenos sanitarios y de nivelación topográfica, como es el caso de la empresa objeto de estudio, Empacor S.A.

Esta investigación nace de la necesidad de la disminución, aprovechamiento y disminución del impacto ambiental que la compañía quiere dar a sus procesos productivos, y los integrantes de este trabajo, realizando la especialización de gerencia de producción y productividad, tienen las competencias suficientes gracias a un equipo multidisciplinario que le permite la integración de soluciones desde distintos puntos de vista para poder generan propuestas que contribuyan al mejoramiento de dicha disposición.

La disposición final de lodos genera para la compañía un costo que en la actualidad se tiene contemplado, pero que puede ser un punto por optimizar, obteniendo un beneficio económico que permita disminuir los costos de operación aumentando la rentabilidad de la compañía, esto es impulsado ya que uno de los integrantes del trabajo de investigación hace parte de la organización y evidencio la oportunidad de mejora sobre la cual se realizó en trabajo. Dicho trabajo también permitirá que la empresa Empacor S.A pueda ser reconocida a nivel nacional por su compromiso con el modelo de economía circular.

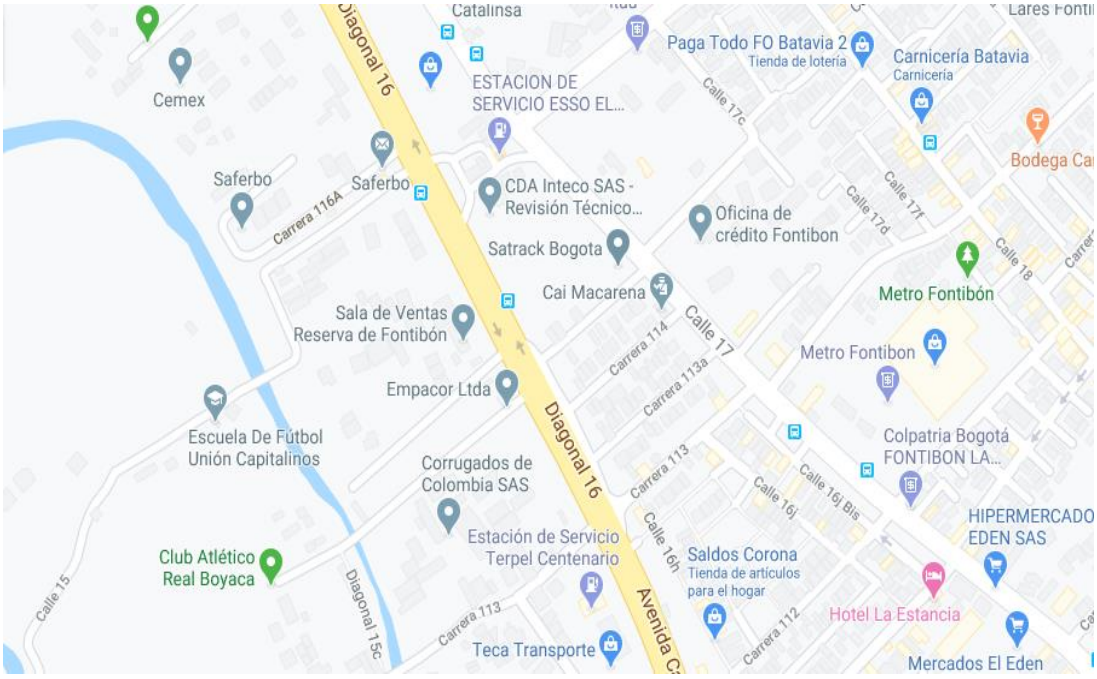
4. Marco referencial

4.1. Marco geográfico

Empacor S.A es una empresa colombiana del sector papelero fundada en 1979, en un inicio fue concebida con el propósito de suplir la demanda en el sector del empaque de corrugados iniciando operaciones con una planta corrugadora ubicada en la zona industrial de Montevideo en Bogotá, convirtiéndose en una de las empresas pioneras en el país en la producción y conversión de papel. La empresa ha ido creciendo en el sector, en el año de 1981 adquirió un molino papelero con ancho de 1.60m en el sector de Fontibón y en un proceso de expansión y modernización en 2013 adquirió un segundo molino papelero con capacidad para producir papel de 2,4m de ancho. En 2012 adquiere la empresa Propac ubicada en Medellín, donde aumenta su capacidad para producir cajas de cartón corrugado. En la actualidad la compañía cuenta con 3 plantas industriales, tiene un poco más de 1300 empleados directos y genera más de 3000 empleos indirectos (EMPACOR S.A., s.f.).

La empresa cuenta con un complejo industrial en Fontibón (Diagonal 16 # 115 – 25) donde se encuentran ubicados 2 molinos papeleros, una planta de producción de pulpa moldeada, un centro de acopio de papel reciclado y una planta de reciclaje de plásticos, con capacidad de producir 8000 toneladas de papel mensualmente.

Figura 2. *Complejo industrial (Fontibón- Bogotá)*



Fuente: Google Maps

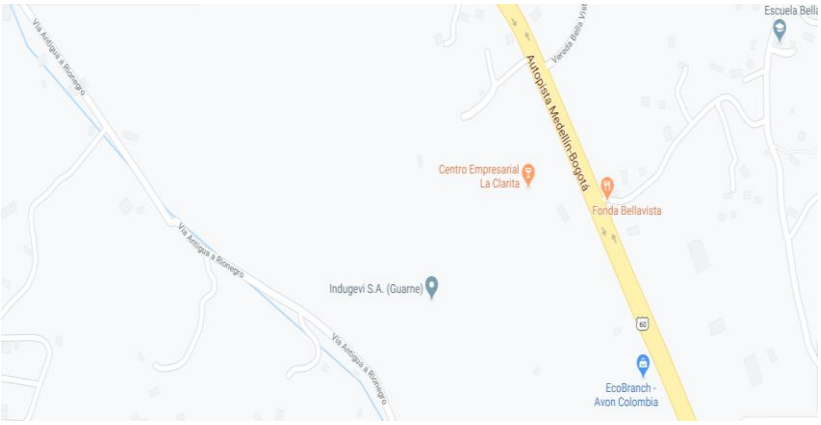
Por otra parte, cuenta con una planta de corrugación ubicada en Bogotá, en la zona industrial de Montevideo (Cr 68 # 17 – 56). con capacidad de 8,000,000 de m^2 /mes de cartón corrugado.

Figura 3. *Planta corrugadora Bogotá- zona industrial Montevideo*

Fuente: Google Maps

Finalmente, cuenta con una planta de corrugación ubicada en Guarne- Antioquia (Autopista Medellín – Bogotá km 27 más 600m - Retorno 7 (Centro Empresarial La Clarita) con capacidad para producir 7,000,000 de m^2 /mes de cartón corrugado.

Figura 4. *Planta corrugadora Guarne- Antioquia*



Fuente: Google Maps

En la actualidad la capacidad de la producción de la empresa con sus dos plantas corrugadoras es de más de 15 millones de metros cuadrados de cartón corrugado mes y en sus molinos papeleros produce más de 8000 toneladas de papel Kraft mes a partir de fibras recicladas.

4.2. Marco conceptual

Se ampliarán los conceptos que se deben tener en cuenta durante el desarrollo del proyecto que van encaminados a brindar una visión de la aplicación de estos en la industria papelera y a brindar una solución de economía circular mediante la reducción, reciclaje y reutilización de los residuos generados. Varios de estos conceptos solo tendrán la referencia bibliográfica, ya que dicha definición es puntual y no varía con la perspectiva del autor o la base bibliográfica.

4.2.1 Residuo

Elemento que se encuentra en cualquiera de los estados físicos de la materia que son descartados pero que pueden llegar a ser aprovechados internamente o externamente. Esta definición tomada de las tres referencias que se describen en la Tabla 2:

Concepto	Año	Definición	Principal aporte
RESIDUO	2005	Según lo descrito en el Decreto 4741 del 2005, un residuo es cualquier objeto, producto, elemento o sustancia que se encuentra en alguno de los estados físicos de la materia y que se generen en procesos industriales, domésticos, comerciales, institucionales y que puedes ser desechados, entregados o aprovechados para la obtención de un nuevo bien o servicio (Presidencia de la Republica de Colombia, 2005).	Objeto, producto o cualquier elemento generado en un proceso que son desechados o aprovechados.
	2005	Material en cualquier estado de la materia descartado, eliminado, considerado inherentemente residual por su propietario.	Material en cualquier estado desechado por su propietario.
	2010	Sustancia u objeto no utilizado por la actividad principal que puede ser utilizado por el mismo propietario o alguien externo (Instituto Nacional de Salud, 2010).	Sustancia u objeto no utilizado por la actividad principal que puede ser utilizado.

Tabla 2. *Definición de residuo*

4.2.2 Lodos

Los lodos son materiales suspendidos que para el objeto de la investigación se generan en la industria papelera por el elevado uso de agua, su composición es principalmente celulosa e impurezas. En la siguiente Tabla 3 se presentan los conceptos:

Concepto	Año	Definición	Principal aporte
LODOS	2005	Materiales suspendidos en un líquido que resultan del tratamiento de agua residuales o cualquier proceso, definición según decreto 0838 23 de marzo de 2005 (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2005).	Material suspendido que resulta de cualquier proceso
	2016	Residuos generados por parte de la industria papelera por el elevado consumo de aguas durante el procesamiento más específicamente en las etapas de clarificación y separación de la pasta y el papel, el contenido de estos lodos es principalmente celulosa (fibras finas) y sustancias que no se logran eliminar durante las etapas de limpieza y separación y demás (Nuno De Coimbra, 2016).	Residuo industria papelera por los altos consumos de agua compuesto en mayor proporción de celulosa.
	2013	Según el Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico de España lo define la mezcla de agua y solidos separada del agua residual obtenida de procesos naturales y artificiales (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2013).	Mezcla agua y solidos obtenida proceso natural o artificial.

Tabla 3. *Definición de lodos*

4.2.3 Relleno sanitario

Un relleno sanitario es un método en el cual se dispone de un lugar diseñado y controlado para la disposición de residuos sólidos que se generan lo que minimiza el impacto ambiental y a la salud pública que estos puedan causar, esta definición se construye en base a las definiciones presentadas en la Tabla 4

Concepto	Año	Definición	Principal aporte
RELLENO SANITARIO	2005	Según Decreto 0838 del 23 de marzo de 2005 es un lugar designado para la disposición de los residuos generados sin causar daño a la salud pública y minimizando los impactos ambientales mediante el aislamiento de los residuos en un área controlada utilizando principios de ingeniería (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2005).	Lugar designado controlado que minimiza el impacto ambiental que generan los residuos sólidos.
	2019	Se considera como el método más eficiente y quizá económico de todo el sanitariamente aceptable para eliminación de desechos. Consiste en el enterramiento de las basuras, por capas sucesivas apisonadas y cubiertas con tierra la cual es compactada a su vez. Se basa en la producción de altas temperaturas que descomponen la materia orgánica y destruyen los gérmenes patógeno (Molano Camargo, 2019).	Método eficiente y económico que consiste en enterramiento de basuras.

	2020	Según la Agencia de Protección Ambiental de los Estados unidos lo define como instalaciones adaptadas y gestionadas para la eliminación de los residuos sólidos y su diseño permite la protección del medio ambiente de los contaminantes que pueden contener los desechos (Agencia de Proteccion Ambiental de los Estados Unidos, 2020).	Instalación diseñada para evitar impacto ambiental utilizado para la eliminación de residuos sólidos.

Tabla 4. *Definición de relleno sanitario*

4.2.4. Economía circular

La economía circular es un modelo que busca la implementación de técnicas encaminadas a la reutilización, reciclaje, recuperación, disminución y aprovechamiento de los residuos generados en un proceso productivo y eliminación del desperdicio para lograr eficiencia en los recursos, rentabilidad y un impacto ambiental positivo esto corresponde a la definición tomada de las referencias que se muestran en la Tabla 5.

Concepto	Año	Definición	Principal aporte
ECONOMÍA CIRCULAR	2017	Se fundamenta en un sistema económico con modelos que se basan en la reducción, reutilización, reciclaje y recuperación de materiales en procesos de producción para lograr un desarrollo sostenible que trae consigo calidad ambiental, prosperidad económica y social (Kirchherr et al., 2017).	Sistema basado en la reducción, reutilización, reciclaje y recuperación de materiales en proceso.
	2019	Implementación de técnicas y regeneración de materiales biológicos para llegar a una visión de cero desperdicios en la cadena de valor con la innovación desde la cadena de suministro hasta la gestión	Técnicas para reutilización de materias y así

		de residuos para lograr una eficiencia recursos y por lo tanto una rentabilidad, minimizando el impacto social, ambiental y económico generado (Farooque et al., 2019).	obtener cero desperdicios y una eficiencia y rentabilidad.
	2020	Alternativa innovadora al modelo lineal que busca redefinir un sistema económico regenerativo manteniendo los productos, componentes y materiales en su nivel más alto de utilidad y valor, con el principio de la eliminación del desperdicio para conservar el capital natural.	Alternativa para sistema que busca la regeneración y la optimización de los componentes para generar utilidad y valor para la preservación del medio amiente.

Tabla 5. *Definición de economía circular*

4.2.5 Método Triangulación

En la Tabla 6. se muestran los aportes realizados por cada autor que definen la triangulación como la utilización y contraste de varios métodos e investigadores para el análisis de un problema de

Concepto	Año	Definición	Principal aporte
TRIANGULACIÓN	1991	"Uso de al menos dos métodos, usualmente cuantitativos y cualitativos para abordar el mismo problema de investigación. Cuando un método de investigación singular es inadecuado, la triangulación se usa para asegurar que se tome una aproximación más comprensiva en la solución del problema de investigación" (Morse, 1991).	Métodos cualitativos y cuantitativos para abordar un tema de investigación.

	2006	La triangulación es un procedimiento heurístico orientado a documentar y contrastar información según diferentes puntos de vista; de ahí que se pueda hablar de diferentes tipos de triangulación según el foco de contraste: técnicas, agentes, tiempos, métodos, o técnicas de análisis de datos (Rodríguez Sabiote et al., 2014).	Método de contaste y documentación de diferentes puntos de vista.
	2017	La triangulación o el uso de los múltiples métodos, es un plan de acción que elevará los prejuicios sociológicos por encima de los sesgos personalistas que surgen de metodologías únicas. Al combinar métodos e investigadores en el mismo estudio, los observadores pueden superar parcialmente las deficiencias del flujo de un investigador y/o un método (Denzin, 2009).	Múltiples métodos e investigadores en un mismo estudio por encima de los sesgos personalistas.

Tabla 6. *Definición de triangulación metodológica*

4.2.6 Proceso analítico jerárquico (AHP)

El proceso analítico jerárquico es una metodología multicriterio para la toma de decisiones mediante la jerarquización, ponderación y aporte de expertos o responsables para la comparación entre pares que involucra intangibles que tienen que ser medidos para la selección de la mejor alternativa, esta definición tomada para nuestro estudio fue tomada en base a las definiciones dadas en la Tabla 7.

Concepto	Año	Definición	Principal aporte
		Teoría de medición que consiste en comparaciones por pares basadas en el juicio de expertos para establecer una prioridad de criterios,	Teoría para toma decisiones basada en la medición por comparaciones

PROCESO ANALITICO JERARQUICO	1993	permitiendo la toma de decisiones que involucran intangibles que tienen que ser medidos (Basak & Saaty, 1993).	que involucran intangibles.
	2016	Proceso flexible de metodología para el análisis de decisión multicriterio con un numero infinito de alternativas mediante el establecimiento de un modelo jerárquico y comparaciones pareadas (Muñoz, 2016).	Proceso metodológico de decisión multicriterio, con un modelo de jerarquización.
	2020	Método ponderación subjetivo, en el que un problema se presenta como una jerarquía que representa la decisión. El aporte de los expertos o responsables de la decisión se toma como una comparación por pares para elección de la mejor alternativa. (Ali et al., 2020).	Método ponderación subjetiva con aporte de responsables de una decisión por comparaciones para elección alternativa.

Tabla 7. *Definición de proceso analítico jerárquico*

4.3. Marco teórico

4.3.1. *Desfibrado*

Se le llama al proceso en donde todas las pulpas químicas de alto rendimiento y semiquímicas rompen sus enlaces por un método mecánico. En el extremo superior del campo de rendimientos (80 a 90%) la operación es analógica al refinado de astillas y requiere la aplicación de grandes cantidades de energía para separar las fibras. En el campo de rendimientos más bajos (50 a 60%) se necesita una cantidad de energía considerablemente menor. el desfibrado debería considerarse aparte del refinado que se lleva a cabo en la fábrica de papel; sin embargo, hay que reconocer que el método y el grado de desfibrado tendrá un efecto en los requerimientos de refinado posteriores. los

refinadores de disco son comúnmente utilizados para el desfibrado. Una configuración popular utiliza un disco rotativo de doble cara entre dos discos estacionarios. La alimentación se hace en el ojo del refinador. Después la pulpa fluye radialmente hacia el exterior entre cada par de disco opuestos, se reúne en una carcasa anular, y fluye bajo presión hacia la descarga.

4.3.2. *Preparación de la pulpa para la fabricación de papel*.

Los objetivos en la preparación de la pulpa son procesar las materias primas fibrosas (pulpas) y los componentes no fibrosos aditivos y combinar estos constituyentes de manera continua y uniforme para preparar la composición a partir de la que se hará el papel. Normalmente se incorporan las siguientes operaciones (Smook, 1989):

1. **Desintegración.** La pulpa seca se dispersa en agua para formar una suspensión. la operación puede realizarse de manera discontinua o continua.
2. **Refinado.** Las fibras son sometidas a una acción mecánica para desarrolla sus propiedades papeleras óptimas con relación al producto que debe fabricarse. Esta operación se realiza normalmente en continuo, pero algunas pulpas son todavía tratadas de forma discontinua.
3. **Utilización de aditivos en la parte húmeda.** una gran variedad de productos químicos y aditivos minerales es utilizada para conferir propiedades específicas al producto final o para economizar el proceso de fabricación. La preparación es llevada a cabo, normalmente, de manera discontinua.
4. **Medida y mezcla.** Los diferentes componentes fibrosos y no fibrosos son combinados de manera continua para formar la composición (Smook, 1989).

4.3.3. *Desintegración*

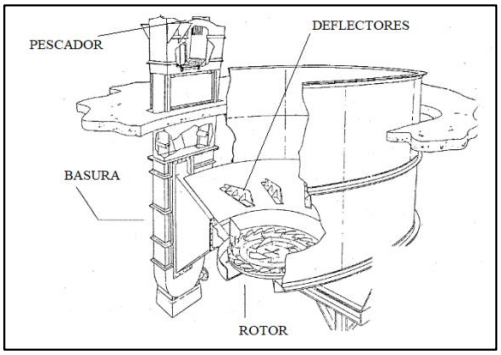
El proceso de desintegración consiste en la formación de una pulpa de papel en el hidropulper[2] que pueda ser bombeada, consiste en una acción mecánica por medio de energía para romper las fibras de papel. Puede ser definida como una acción mecánica que trasforma las fibras de la pulpa en una suspensión (Smook, 1989). El funcionamiento del hidropulper es muy similar al de una licuadora, el papel es trasportado en forma de pacas a través de una banda trasportadora y es depositado sobre la parte superior del hidropulper, como se muestra en las figuras 5 y 6.

[2] Hidropulper: equipo utilizado para realizar el desfibrado mecánico de las fibras por medio de acción de un rotor y movimiento de las fibras de papel

Figura 5. *Banda trasportadora Hidropulper*

Fuente: Empacor S.A.

Figura 6. *Imagen de hidropulper seccionado y en proceso de pulpeado*



Fuente*: Manual para técnicos de pulpa y papel, Smook G. 1989 pág. 202*

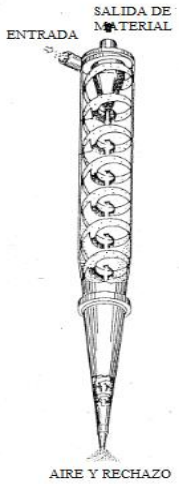
En los hidropulpers continuos es más común proseguir el tratamiento, después de este se procede a completar el proceso de desintegración; Las máquinas típicas para estos procesos son denominadas "fiberizers" despastilladores, o dispersores (despastilladores finos) (Smook, 1989).

Las materias en su proceso de desintegración consumen mucha energía, el papel Kraft es uno de los más difíciles de desintegrar, para que este proceso se dé fácilmente se debe adicionar agua a con una temperatura elevada, esta debe estar por encima de los 50°C para que la consistencia de la pulpa este entre el 5 y el 7%.

La mezcla en el hidropulper toma un tiempo que va entre los 25 a 35 min dependiendo del material utilizado, es un proceso de movimiento circular accionado por un rotor en la parte

inferior del hidropulper y con unos deflectores[3] colocados sobre las paredes de este, cuyo objetivo es cortar el flujo del movimiento e introducir nuevamente las fibras al rotor. Con este movimiento las fibras del papel por efecto de la fricción se van desintegrando hasta formar una pasta, cuando el material ha conseguido la consistencia ideal (90% agua 10% de fibra de papel) es retirada del hidropulper para pasar por una serie de equipos de limpieza que retiraran plástico, grapas, alambre, cinta y demás partículas ajenas la fibra de papel, en este proceso de clasificación sale un primer desperdicio que puede ser agrupado en dos grandes componentes, chatarra y plásticos finos. Una vez la pulpa ha pasado este punto, es almacenada en tanques en donde se realizará una limpieza profunda y saldrán lodos húmedos en menor cantidad gracias a equipos utilizados como el desarenador[4] (Smook, 1989) el cual se muestra en la figura 7.

Figura 7. *Imagen de un desarenador*



Fuente*: Manual para técnicos de pulpa y papel, Smook G. 1989 pág. 110*

4.3.4. *Refinado*

Este término se refiere a la acción mecánica de cuchillas rotativas situadas frente a una platina. Cuando las fibras pasan perpendicularmente a las cuchillas, se abren pequeños enlaces para que la fibra a nivel microscópico se pueda enlazar con otras fibras y formar papel. Luego de este proceso de refinado, la pulpa pasa a un tanque de almacenamiento llamado tanque de máquina, en donde se adicionan químicos como barredores de cargas, biocidas (para la eliminación de bacterias), encolantes (utilizados para la adhesión de las fibras) y colorantes (el cual hace que el papel cartón tenga su color uniforme y característico.

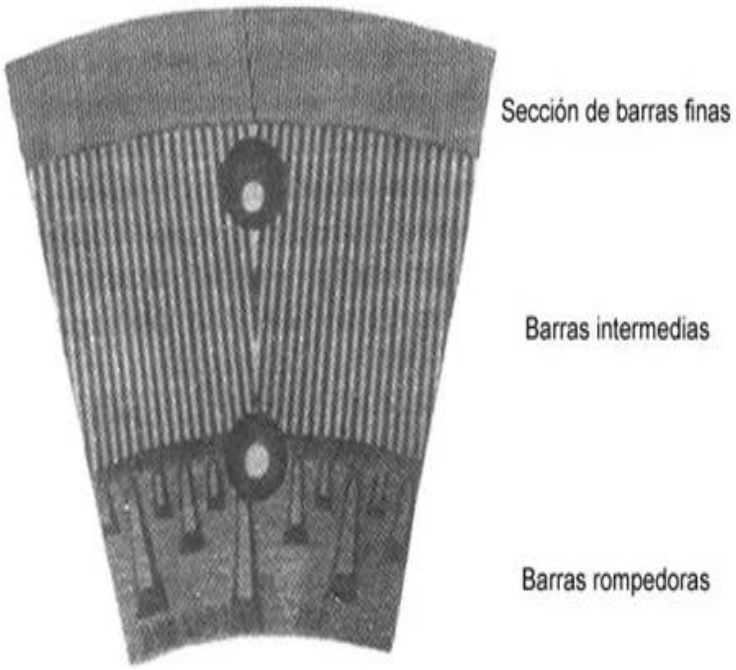
[3] Deflectores: laminas ubicadas en el perímetro del hidropulper, cuya función es cortar el flujo laminar de la pulpa para lograr un mejor desfibrado.

[4] Desarenador: equipo utilizado en la industria papelera para retirar la arena o sílice del papel.

Los refinadores[5] poseen dos discos, uno normalmente se encuentra fijo y el otro se encuentra móvil enganchado de la trasmisión y gira entre las 1800 y 2000 revoluciones por minuto (rpm).

En las caras de los discos se encuentran gravadas hendiduras de diferentes formas y profundidades a través de las cuales circula la pulpa y dependiendo de su separación se obtendrá el tamaño de la fibra y la calidad del papel deseado. Como se muestran en las figuras 8 y 9.

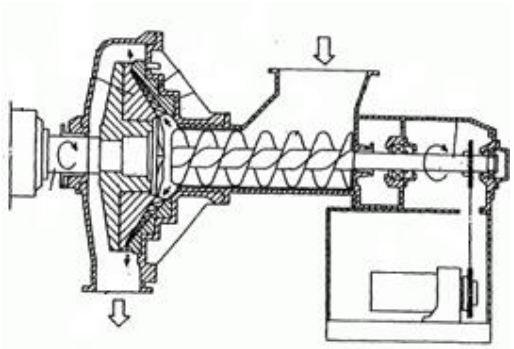
Figura 8. *Disco refinador*



Fuente: *Manual para técnicos de pulpa y papel, Smook G. 1989 pág. 54*

[5] Refinadores: equipos utilizados para la preparación del papel, cuya principal función es darle características de unión a las fibra de papel.

Figura 9. *Refinador*

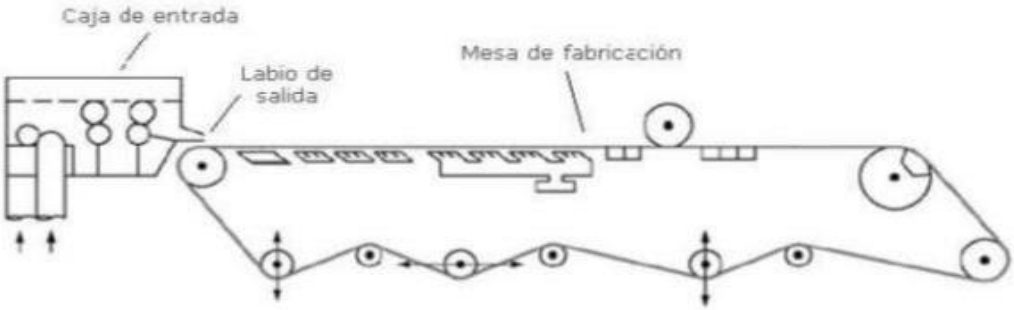


Fuente: *Manual para técnicos de pulpa y papel, Smook G. 1989 pág. 53*

4.3.5. *Formación del papel*

La formación del papel inicia cuando se extrae la pulpa del tanque de máquina por medio de una fan pump[6] (bomba centrífuga de alto caudal) y es depositada en una tina de formación, la cual se encarga de distribuir uniformemente la pulpa sobre la malla en la mesa de formación del equipo. Debajo de esta mesa se encuentran cajas de vacío que retiran la mayor cantidad de agua de la pulpa y el papel queda plasmado en la malla con el gramaje requerido que va desde los 90 g por m^2 hasta los 250 g por m^2. Como se muestra en la figura 10.

Figura 10. Mesa de formación

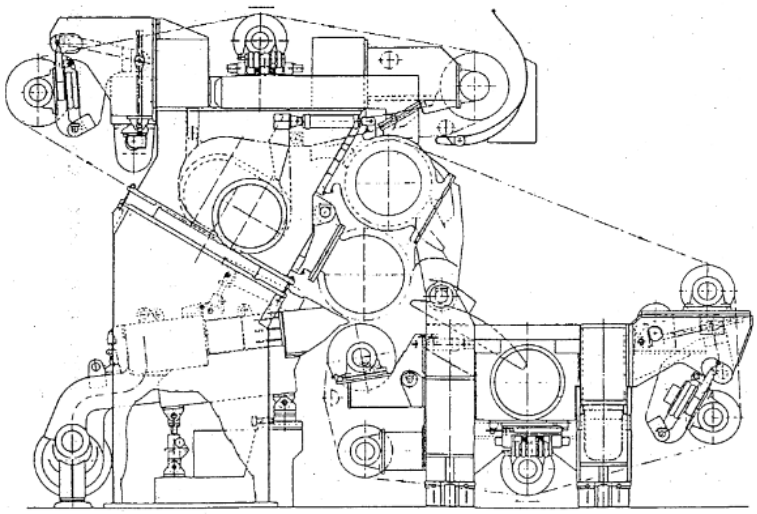


Fuente: *Manual para técnicos de pulpa y papel, Smook G. 1989 pág. 228*

Luego de este primer proceso de formación y extracción de agua, el papel recién formado se pasa por una prensa (figura 11) en donde se le extrae agua por presión y las fibras de papel entrelazadas son comprimidas para darle paso a una lámina de papel que es retirada de la malla de formación.

[6] Fan pump: es una bomba centrifuga de alto caudal encargada de trasportar la pulpa del tanque de maquina a la mesa de formación.

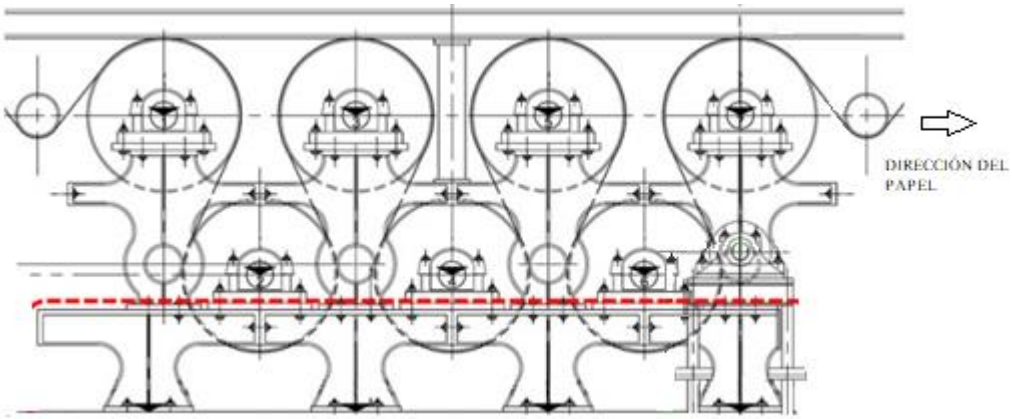
Figura 11. Prensa de secado



Fuente: *Manual para técnicos de pulpa y papel, Smook G. 1989 pág. 233*

Luego el papel es soportado sobre una banda que pasa por una serie de secadores, como se muestra en la figura 12, que por acción de compresión retiran el exceso de agua para poder tener una línea continua de papel seco, el cual es enrollado en una bobina de papel al final de la línea por medio de un equipo que se llama el pope reel[7], como se muestra en la figura 13.

Figura 12. *Secadores de papel*



Fuente: Empcaor S.A.

[7] Pope reel: equipo encargado de enrollar el papel para formar una bobina de papel, dando la presentación final del producto.

Figura 13. *Pope reel*

Fuente: Empacor S.A.

Una vez el papel sale del pope reel, el rollo debe pasar por un equipo llamado rebobinadora y del cual obtendrá sus características finales, como lo son: metraje deseado, grado de compactación, bordes alineados, ancho requerido, como se muestra en la figura 14.

Cuando el papel llega a esta instancia debe contar con todas las características de calidad deseadas como gramaje y humedad.

Figura 14. *Rebobinadora*

Fuente: Empacor S.A.

Una vez el papel ha pasado por la rebobinadora, el rollo es sometido a verificaciones de calidad donde se certificad la conformidad del producto. Luego es etiquetado y almacenado.

Finalmente, el rollo deberá pasar por un proceso de curado que garantiza su optimo uso antes del despacho, como se muestra en la figura 15.

Figura 15. *Patio de almacenamiento de rollos*

Fuente: Empacor S.A.

4.3.6. *Proceso de recolección de lodos*

Los lodos son recolectados de dos fuentes:

A. Una vez finaliza el desfibrado del papel en el hidropulper, a las fibras cortas se les realiza un proceso de limpieza a través de tamices y zarandas para retirar todas las impurezas como madera, alambre y plástico. El resultante se le conoce como lodos húmedos.
B. El agua de proceso que es recolectada en la mesa de formación por acción del vacío es dirigida hacia la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) la cual es tratada para su reutilización en el proceso. Los sólidos retirados del agua son prensados y a esto se le conoce como lodos secos. Este será descrito en detalle en el siguiente numeral.

4.3.6.1. ***Tratamiento de aguas residuales de proceso.*** Como resultado del proceso de formación de pulpa y papel el agua recibe gran cantidad de contaminantes las cuales deben ser tratadas para su posterior utilización o devolución a los efluentes, es por esos que todo molino papelero está obligado a tener una planta de tratamiento de aguas, para poder garantizar un sistema de cero vertidos.

La PTAR debe tener las siguientes características:

- Una etapa de homogenización, neutralización del PH y decantación con el propósito de sedimentar los sólidos en suspensión.
- Tratamiento con oxidación con el propósito de destruir las moléculas orgánicas de gran tamaño.
- Tratamiento biológico anaerobio, que logue la disminución de la materia orgánica disuelta en el agua.
- Filtros de arena para un proceso de osmosis inversa.

En la figura 16 se muestra un ejemplo del proceso descrito.

Cuando el agua ha pasado por estas etapas, sale de la PTAR en condiciones ideales para su recirculación y como resultado de este proceso los finos que se encontraban mezclados con el agua pasan a llamarse lodos.

Figura 16. *Planta de tratamiento de aguas PTAR*

Fuente: *Adaptado de industry-treatment-sewage-water.jpg (910×592) (piqsels.com)*

Los lodos que salen de la PTAR, pasan por prensas de la figura 17, donde se les retira el agua que pueda quedar en los lodos y se depositan en un contenedor como se muestra en la figura 18.

Figura 17. *Prensa de lodos*

Fuente: Empacor S.A

Figura 18. *Contenedor de lodos secos*

Fuente: Empacor S.A

Estos lodos secos son la materia de estudio en este proyecto.

4.3.7. Proceso analítico jerárquico

Método de decisión multiatributo, denominado AHP(Analytic Hierarchy Process) proceso analítico de jerarquización que permite la ponderación subjetiva basada en la jerarquización desde el objetivo principal como nivel superior, los criterios y subcriterios en un nivel intermedio y en el nivel inferior las alternativas propuesto.(Ali et al., 2020).Para la evaluación de las alternativas se plantea comparaciones entre pares realizadas por expertos o responsables de la decisión para la elección de la mejor solución al problema planteado.

Según lo propuesto por (Basak & Saaty, 1993) se deben llevar los siguientes pasos en la ejecución del método AHP:

1. Determinar el problema y el tipo de conocimiento que se requiere para su estudio.

2. Estructurar la jerarquía desde el objetivo, definición de criterios, subcriterios y alternativas.
3. Recolectar datos e información necesaria para realizar las comparaciones por medio de una matriz y obtener las prioridades dl criterio o subcriterio.
4. Para cada elemento se anexan sus valores ponderados hasta las prioridades finales de la alternativa.

Para llevar a cabo las comparaciones entre pares (subcriterio, criterios) es necesario manejar una escala que indique que tan dominante es un elemento respecto a otro que se compara. Para lo cual el proceso define una escala que se muestra en la Tabla 8 y se forma una matriz para determinar qué tan dominante es un elemento sobre el otro. Se perciben relaciones entre los elementos que permite establecer una escala de preferencia sobre los elementos, permitiendo integrar pensamiento lógico, sentimientos e intuición (Pacheco & Contreras, 2008).

Fuente*: Aristóteles, 2015. Pag 257*

Intensidad de Importancia	Definición
1	Igual Importancia
3	Importancia moderada
5	Fuerte Importancia
7	Muy fuerte o importancia demostrada
9	Importancia extrema
2,4,6,8	
Valores Recíprocos	Si la actividad i tiene uno de los números diferente de cero ya nombrados, cuando se compara con la actividad j, entonces la actividad j tiene el valor reciproco correspondiente cuando se compara con la actividad i.

Tabla 8. *Escala comparación método AHP*

Una vez obtenido los resultados en la matriz, deben ser validados para constatar que sean congruentes y consistentes a ser juicios dados por los responsables o expertos. Es necesario cierto porcentaje de consistencia en el establecimiento de prioridades para que sean válidos, eso se determina mediante la Proporción de consistencia siendo esta la relación entre el índice de consistencia y el índice aleatorio. Para la determinación del índice de consistencia se deben tener en cuenta las ecuaciones de las figuras 19 a la 21, y para el índice aleatorio la Tabla 9.

Realizando los cálculos correspondientes de obtiene la proporción de consistencia la cual no debe ser superior al 10% para certificar que los juicios expresados en la matriz son consistentes, de lo contrario debería ser reevaluada la matriz (Pacheco & Contreras, 2008).

Figura 19. *Definición relación de consistencia*

$$RC = \frac{CI}{RI}$$

Fuente: (Pacheco & Contreras, 2008)

Donde:

CI: índice de consistencia

RI: Índice aleatorio

Figura 20. *Definición Índice de consistencia*

$$CI = \frac{\lambda_{Max} - n}{n - 1}$$

Fuente: (Pacheco & Contreras, 2008)**.**

Figura 21. *Definición del máximo valor propio de la matriz de comparaciones*

$$\lambda_{Max} = V * B$$

Fuente: (Pacheco & Contreras, 2008)**.**

Donde:

λ_{Max} : es el máximo valor propio de la matriz de comparaciones

V : es el vector de prioridades obtenido en la matriz de prioridades

Fuente: (Pacheco & Contreras, 2008).

Tamaño de la Matriz	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Índice Aleatorio	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Tabla 9. *Índice aleatorio por tamaño de matriz*

Finalmente se debe realizar una revisión de la información con la que se evalúan las alternativas, es decir si se cuentan con parámetros cualitativos deben ser cuantificados para que el método sea aplicable, para esto se construyen tablas de homologación numérica que contengan límite inferior, superior e intermedio, teniendo en cuenta que sean iguales para todos los parámetros.

Con lo anterior, ya podemos proceder a multiplicar cada parámetro con correspondiente valor ponderado del criterio para cada alternativa, se identifica de mayor a menor las alternativas y se selecciona o se da preferencia a la que obtuvo mayor valor en la evaluación (Pacheco & Contreras, 2008).

4.4. Marco normativo o legal

Los antecedentes jurídicos del marco normativo de la gestión de residuos en Colombia, tiene su origen en el Código Nacional de recursos naturales renovables y de protección al medio ambiente, Decreto-Ley 2811 de 1974. (*Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección Al Medio Ambiente Decreto 2811 de 1974.*, 1974)

En el artículo 34 de dicho decreto, se reglamenta el manejo de residuos, basuras y desechos y desperdicios. A su vez indica que la investigación científica y técnica se fomentará para perfeccionar y desarrollar nuevos métodos para el tratamiento, recolección, depósito y disposición final de los residuos sólidos, líquidos o gaseosos no susceptibles de nueva utilización.

De igual manera en el Art. 35, se prohíbe descargar, sin autorización los residuos y en general desechos que deterioren los suelos, además está prohibido el abandono de residuos o desechos peligrosos en vías, suelos, humedales, parques, cuerpos de agua o en cualquier otro sitio (Presidencia de la Republica de Colombia, 2005).

Por su parte la ley 9 de 1979, complementa en su artículo 31 y 32, que quienes produzcan basuras con características especiales, serán responsables de su recolección y disposición final, y para tales efectos podrán contratar los servicios de un tercero, el cual deberá cumplir las exigencias que para tal fin establezca el ministerio de salud o la entidad delegada (Congreso de la República de Colombia, 1979).

Ya en el año 1998 el Ministerio de Medio Ambiente estableció la política para la gestión integral de residuos, cuyos objetivos específicos entre otros, son aumentar el aprovechamiento racional de residuos generados y mejorar los sistemas de eliminación, tratamiento y disposición final de los residuos (Ministerio del Medio Ambiente, 1998).

A nivel municipal y de manera más explícita la empresa de acueducto, alcantarillado y aseo de Bogotá a través de la resolución 01 del 2015, formula en el numeral 6.4 las limitaciones de los vertimientos, en donde se especifica que los vertimientos que puedan provocar obstrucción de los colectores o interferir con la operación normal de cualquier parte del sistema de alcantarillado tales como: lodo, papel o cartón y material extraído de las plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas o industriales (Empresa de acueducto, 2015)

Hoy en día, el desarrollo de la gestión de residuos es una prioridad en la política pública nacional. Para lograrlo, desde el sector de residuos sólidos, se propone avanzar en una economía circular, la cual busca que el valor de los productos y materiales se mantenga durante el mayor tiempo posible en el ciclo productivo. Para ello se desarrolló en el año 2016 la política nacional para la gestión integral de residuos como política de interés social, económico, ambiental y sanitario, la cual modifica la política de 1998 que era liderada en ese entonces por el Ministerio del Medio ambiente, el hoy en día Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio y el DNP; en articulación con el Ministerio de Educación Nacional: el Ministerio de Minas y Energía; entidades adscritas y el DANE a través del documento CONPES 3874. La política se implementará entre los años 2016 y 2030 (Departamento Nacional de Planeación, 2016).

En concordancia con esta política establecida en el CONPES 3874, el presidente de la República de Colombia, Iván Duque firmó el 24 de diciembre del 2018 el decreto 2412 de 2018 el cual reglamenta el incentivo al aprovechamiento y tratamiento de residuos sólidos (IAT) conforme a lo establecido en el artículo 88 de la ley 1753 de 2015. (Ministerio de vivienda ciudad y territorio. Republica de Colombia, 2018)

Este incentivo aplica para las personas prestadoras de las actividades principales y complementarias del servicio público de aseo y a las entidades territoriales y el cobro de este se hará a los suscriptores en los municipios y distritos en los cuales en sus planes de gestión integral de residuos sólidos (PGIRS) hayan definido proyectos de aprovechamiento viables.

Este decreto entró en vigencia a partir del 1 de agosto del 2019 y el valor de incentivo es SMMLV * 0.80% por cada tonelada dispuesta en los rellenos sanitarios.

Los recursos provenientes del incentivo serán destinados a la actividad de aprovechamiento del servicio público de aseo para el desarrollo de infraestructura,

separación en la fuente, recolección, transporte, recepción, pesaje, clasificación y otras formas de aprovechamiento, desarrolladas por los prestadores de la actividad de aprovechamiento y recicladores de oficio.

4.5. Marco histórico

Todo comenzó con la necesidad de plasmar nuestra cultura, nuestros hábitos y nuestra historia, así fue como inició la industria del papel la cual data del año 200 A.C. la fabricación industrial comienza en el siglo XIX y con ello el comienzo de los retos de producción y aprovechamiento de la materia prima, el aumento exponencial de la producción iba acompañado del requerimiento de uso de gran cantidad de recursos naturales ya que para la fabricación de una tonelada de papel era necesario de 2 a 2.5 toneladas de madera y entre 30 y 40 metros cúbicos de agua además de otros recursos necesarios para la operación de los equipos y maquinaria en estas fábricas, todo esto acompañado de tintas y químicos contaminantes (Matott, 2017).

El impacto medioambiental desde entonces ha llevado a la necesidad de la reutilización y el reciclaje de materias primas y de tal forma disminuir el uso de recursos naturales (de Azevedo et al., 2019).

Desde hace un tiempo la industria papelera ha prestado atención a los residuos que son generados y uno de los más importantes son los llamados “lodos” los cuales, son residuos compuestos por agua y materiales sólidos orgánicos e inorgánicos, que en resumidas cuentas contiene fibras de papel que no es posible reutilizar, plásticos, desechos metálicos como grapas anillos etc. (de Azevedo et al., 2019). Diferentes investigaciones a nivel nacional e internacional han tratado de dar con la solución más efectiva y amigable con el medio ambiente de tal forma que puedan mejorar su productividad en cuanto a la reutilización y aprovechamiento de estos lodos (de Azevedo et al., 2018).

Los trabajos realizados en otros países muestran las diferentes alternativas de reutilización que se pueden dar a los lodos provenientes de las industrias papeleras, como es el caso de los ladrillos, biorrefinerías (Mandeep et al., 2020) adicional a esto se han hecho trabajos en paneles prefabricados para la construcción realizando mezclas adecuadas, los materiales y demás elementos necesarios que determinen las posibilidades de usar estos lodos y que lleven a la elaboración de un buen producto de calidad y que cumpla con los estándares y normativas (Quinchía et al., 2007).

La caracterización del residuo generado para nuestro caso los lodos de papel juegan un punto importante dado que a partir de esta se puede llegar a concluir los posibles usos (ANDI - Cámara de la Industria de Pulpa Papel y Cartón, 2017). A partir de esta caracterización se han podido realizar estudios enfocados a la reutilización en otras industrias como en la producción de cemento (Frías et al., 2015).

En trabajos realizados en Colombia directamente en la industria del papel se describen 4 posibles alternativas a la gestión de lodos generados como residuos, estas alternativas van muy a la par de estudios realizados a nivel internacional ya que se puede llegar a la conclusión que en general solo existen estos caminos para lograr un cambio en el proceso

y en el resultado del mismo, estas alternativas habla de cambios en el origen, reciclaje del lodo, reutilización de lodos o una mejor disposición de lodos (Garnica, 2013) algunos estudios realizados van enfocados a una de estas alternativas como lo es la reutilización de lodos en industrias de producción de adoquines de las cuales salen conclusiones como que, hace falta más investigación y desarrollo ya que algunas pruebas realizadas son fallidas por implementaciones empíricas y con falta de análisis y base científica en la ejecución (Reyes Cantor & Contreras Alfonso, 2015).

Actualmente en Colombia y en empresas como Empacor S.A. se realiza únicamente disposición de los lodos a relleno sanitarios y de nivelación topográfica, lo cual abre un abanico de posibilidades a la reutilización y búsqueda de cerrar el ciclo de economía circular que es una de las metas corporativas.

5. Diseño metodológico

Se utilizó en el proyecto de investigación una metodología basada en la recolección de "datos secundarios que implica la revisión de documentos, registros públicos y archivos físicos y electrónicos de otros investigadores" (Hernández Sampieri et al., 2014). Se realizó una confrontación de información mediante el método de triangulación, donde los enfoques cualitativo y cuantitativo se enriquezcan el uno del otro para alcanzar los objetivos de estudio.

Se definió la fase exploratoria, análisis y de diseño que conllevan a desarrollar la propuesta de mejora.

5.1. Fase exploratoria

En esta fase se realizó un levantamiento de información general sobre el manejo y disposición de residuos (lodos papeleros), para construir el marco referencial.
Se llevó a cabo las siguientes actividades:

- Se obtuvo históricos de los últimos 3 años en la empresa Empacor S.A. (anexo 1) sobre las cantidades de lodos resultantes, y el costo de disposición de los mismos.
- Se recolectó datos de caracterizaciones realizadas en Empacor S.A. a los lodos resultantes del proceso de desfibrado del papel.
- Se recopiló información en libros, artículos o publicaciones especializadas sobre la reutilización y disposición de lodos provenientes de industrias papeleras.

5.2. Fase de análisis

Con base en la información recolectada en la fase exploratoria, se realizó un análisis que permitió establecer la relación de los lodos generados en Empacor S.A. con los lodos de otras industrias papeleras y como se realiza su disposición final.
Las actividades por ejecutadas fueron:

- Se analizó de la situación actual de disposición y los impactos generados por esta actividad.

- Se contrastó los resultados de la caracterización de los lodos con los proyectos desarrollados a nivel global para determinar un posible método de reutilización en la organización u otras industrias en Bogotá y sus alrededores.

5.3. Fase de diseño

Durante esta fase se articuló las dos fases anteriores para poder plantear una propuesta que le genere valor a la empresa Empacor S.A. mediante la reutilización de los lodos que normalmente se vertían en rellenos sanitarios.

Se llevaron a cabo las siguientes actividades:

- Se estableció una propuesta de reutilización de lodos que permita la incorporación de estos residuos en otras industrias.
- Se determinó los beneficios económicos, ambientales y sociales que genera el aprovechamiento de estos lodos.

6. Resultados obtenidos

Para el desarrollo del proyecto acerca de la reutilización de los lodos papeleros, se realizó un trabajo de investigación acerca de los impactos sobre medio ambiente causados por la disposición actual de los lodos, sus aplicaciones a nivel mundial, estudios que se han realizado para su aprovechamiento, posibles alternativas aplicables en la cuidad de Bogotá y sus alrededores. Finalmente se plantean las recomendaciones a la empresa Empacor S.A, acerca del tratamiento de estos lodos papeleros y la disminución del impacto en el medio ambiente.

Esto permitirá a la empresa tener una opción para poder migrar su operación actual hacia su objetivo de trabajar bajo un modelo de económica circular en la utilización de residuos no aprovechables, y obtener beneficios económicos, ambientales y sociales.

La situación actual de Empacor respecto a las cantidades y costos de disposición se validaron respecto a los últimos tres años (**Anexo 1**) determinando que el promedio mensual es de 638 ton/mes, y su disposición cuesta alrededor de 17.9 millones de pesos/mes. La empresa cuenta con una caracterización inicial la cual nos fue suministrada (**Anexo 3**) que permite determinar la composición general de los elementos que contiene el lodo. Respecto a la peligrosidad de los lodos generados por la industria del papel según los estudios realizados en otras investigaciones (Garnica, 2013; Latorre-Malaver & Cote-Alarcon, 2020), no poseen ninguna de las siguientes características: corrosivos, explosivo, toxico, inflamable, infecciosos o radioactivo, enmarcado en el Decreto 4741 de 2005 a nivel nacional por el gobierno Colombiano (Presidencia de la Republica de Colombia, 2005), como se evidencia en el (**Anexo 4**.)

6.1. Identificación de impacto ambiental generado en la disposición de los lodos en rellenos sanitarios y de nivelación topográfica en la empresa Empacor S.A.

La industria papelera desde hace mucho ha intentado reducir su impacto ambiental negativo y aumentar su impacto positivo dado que se han enfocado en una mejora continua a sus procesos, tanto de producción con materia prima virgen como su producción con materia prima 100% reciclada ((CAR/PL), 2005).

Al relacionar la producción con impacto ambiental se debe hablar de economía circular, esta lo que busca es prevenir, reducir y reutilizar internamente.

La prevención: su objetivo es evitar la generación de contaminantes desde el inicio de la producción, con la implementación de nuevas tecnologías, proceso y materiales.

La reducción: con esta metodología se busca que los procesos productivos que ya están establecidos sean reformados, de tal forma que se minimicen los residuos contaminantes que se generan.

Reutilización interna: es la búsqueda en la cual un residuo que antes era desechado se convierta en materia prima para ser reutilizada dentro de la misma industria ya sea total o parcialmente ((CAR/PL), 2005).

El desarrollo sostenible es el propósito principal de la producción limpia, pero para lograrlo hay que implementar un trabajo de largo plazo, no es fácil para las industrias lograr que sus procesos sean 100% sostenibles por tanto los cambios se van haciendo paso a paso. En el mundo existe miles de fábricas de papel que utilizan materia prima virgen, y muchas más que se dedican a la fabricación de papel con base en materia prima 100% reciclada, esta propiedad que brinda el papel de ser reciclado permite sostener una industria como la de producción de cajas de cartón a base de papel reciclado, existe una parte que termina como desecho y es ahí donde se debe intervenir el proceso para cerrar el círculo, llevando una producción sostenible cuyo ciclo sea la economía circular con producción 100% limpia. (CAR/PL, 2005)

Últimamente en el mundo se tienen políticas y una visión de cuidado ambiental, por lo que muchas industrias buscan reducir o eliminar sus desechos, consumir menos agua y mejorar el aprovechamiento de energías, de tal forma que su impacto ambiental negativo tienda a ser lo más bajo posible. Los beneficios de mejorar el impacto ambiental son muchos, entre ellos el contribuir con la salud humana, mejorar el medio ambiente, disminuir los costos de producción y un punto muy importante como es mejorar la imagen corporativa, ya que actualmente para el consumidor es de vital importancia y genera un valor agregado el hecho de que se esté teniendo en cuenta el impacto ambiental y su diminución. (CAR/PL, 2005)

La era digital ha disminuido una parte del papel impreso que se consumía en el mundo, pero aun así se han aumentado consumo de otros productos de papel como el papel higiénico, cajas de cartón etc. Este aumento conlleva a la utilización de mayor materia

prima y químicos necesarios para la producción de este y por tanto se ve directamente reflejado en los residuos finales de la producción de papel. (CAR/PL, 2005)

Existen diversos tipos de desechos en la producción de papel. Se han realizado múltiples estudios para determinar el impacto ambiental que generan, las emisiones de carbono pueden estar alrededor del 8% (Sun et al., 2018), para este caso revisaremos como se está manejando la disposición final de los lodos producidos. Se dice que del 100% de los lodos producidos, alrededor del 21% termina en vertederos, 28% se reutiliza como fuente de energía dentro de la misma industria, 2% como fuente de energía en otras industrias, 13% como uso directo agrícola, 14% como compostaje, 9% como materia prima para la industria de la cerámica, 3% como materia prima para la industria de los cementos, 3% como materia prima en otras industrias y 7% otros usos (López, 2014).

Constantemente se busca la forma de reutilizar estos desechos y como se describió anteriormente sigue existiendo un 21% que termina en los vertederos o rellenos sanitarios, aunque la mayoría están siendo reutilizados, aún no se está cerca de cerrar el círculo y en muchas empresas ni siquiera se logra llegar a la disposición anteriormente descrita. Sigue siendo una tarea de la industria papelera, encontrar la forma de cerrar el círculo logrando una producción sostenible y 100% amigable con el planeta.

En la empresa Empacor S.A. la disposición del lodo se hace 100% en rellenos de nivelación topográfica, por tanto, su impacto ambiental esta dado por la cantidad mensual que es producida. Se tiene que en promedio Empacor S.A. produce 638 toneladas de lodos al mes, adicional a esto la calidad de los lodos generados son considerados residuo no peligroso, por tanto, su disposición final puede tener un mejor manejo.

Para entender el impacto generado es necesario describir que es un relleno y como impacta al medio ambiente. Se llama relleno sanitario a un suelo que ha sido manejado de forma especial, para poder usarlo se tiene que realizar una impermeabilización que garantice que no sean afectadas las fuentes acuíferas, estos rellenos se construyen en zonas alejadas de las zonas poblacionales debido a la producción de gases metano, los cuales pueden llegar a ser bastante fuertes por la descomposición de materia orgánica.

(Quinchía et al., 2007) nos habla sobre la preparación de un lote o terreno para un relleno sanitario y nos menciona los impactos descritos a continuación:

- Cambios en las características fisicoquímicas del suelo
- Disminución de la cobertura vegetal
- Perdida de la capacidad productiva del suelo
- Migración de fauna
- Alteración del paisaje
- Generación de olores
- Generación de ruido

- Generación de material particulado
- Generación de CO2
- Vertimiento de lixiviados tratados

Cuando se usa para relleno de nivelación topográfica no se mezcla con otro tipo de residuos por tanto su impacto está directamente en la degradación del lodo y su contenido.

Empacor S.A. en la búsqueda de cerrar el ciclo de su economía circular, intenta dar una mejor disposición de los lodos resultantes de sus procesos, lo que hará que cuando estos se comiencen a usar con otro propósito productivo se verá disminuido el impacto ambiental.

Se debe tener en cuenta que en cuanto los lodos inician su vida en otro proceso productivo desde ese punto hasta el final tendrán otro tipo de impacto ambiental el cual no será tomado en cuenta por fines prácticos dentro de este proyecto dado su alcance.

6.2. Análisis y revisión bibliográfica de estudios y aplicaciones globales de los lodos de la industria papelera.

Teniendo en cuenta la disposición que hace actualmente Empacor S.A. en rellenos de nivelación topográfica y rellenos sanitarios se realizó una investigación de los posibles usos utilizando el método de triangulación el cual permitió documentar y contrastar las alternativas existentes desde varios puntos de vista para llegar a la solución del problema.

De la caracterización obtenida de Empacor S.A. se contrasta la composición química de los lodos papeleros con los resultados de las diferentes investigaciones, encontrando una similitud en el porcentaje de elementos químicos por lo cual es comparable el lodo estudiado de Empacor S.A. con otros residuos generados otras industrias papeleras a nivel internacional (ver tabla 11) y (**Anexo 3**).

A continuación, presentamos las alternativas desarrolladas:

6.2.1. *Aplicación de lodos sector construcción*

La gestión actual de los lodos de la industria de fabricación de papel ha sido un problema en el cual se busca una solución constantemente, la capacidad de reutilización es baja y su finalización en vertederos es lo común, dado esto, se hace necesario evaluar todas las posibles alternativas en la cuales se pueda incluir el lodo como materia prima y así reutilizar este material. La industria de la construcción es una de las alternativas en las cuales se puede reutilizar una parte de estos lodos y dado el volumen de generación es importante evaluar todas las posibles alternativas.

En países como Perú se han realizados estudios encontrando un ideal de combinación entre los lodos y otros materiales para la construcción dando como resultado una mezcla de cemento en un 45% y lodos de papel en un 55% entre otros (López, 2014) este y otros

estudios son la base para tener en cuenta como una posible alternativa en el uso de lodos de papel y así disminuir la cantidad de lodos que terminan en vertederos.

Dadas las características fisicoquímicas de los lodos generados en el proceso de fabricación de papel y su poder de aprovechamiento, la industria de la construcción ha planteado en varios estudios usar estos residuos como aditivos que sustituirían en una proporción los materiales cementantes en la fabricación de construcción como adoquines, cemento, ladrillos (Goel & Kalamdhad, 2017; Reyes Cantor & Contreras Alfonso, 2015; Yan et al., 2011).

La composición fisicoquímica en general de estos lodos se divide en, 40% parte orgánica (celulosa) y un 60% parte inorgánica (óxidos, metales) , con una concentración alta de óxidos de aluminio, calcio y sílice representando más del 43% del total de óxidos según la tabla anexa recopilada por (Frías et al,2015) lo que proporciona una gran posibilidad para la producción de Metakaolin a partir de la caolín natural bajo tratamiento térmico controlado.

Figura 22. *Composición química de los residuos de lodos de papel seco*

Óxidos(%)	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	Fe_2O_3	Na_2O	K_2O	SO_3	TiO_2	P_2O5	LOI
Sutcu y Akkurt	6.42	4.14	32.91	1.54	0.28	-	0.12	-	0.09	-	53.8
Pera y Amarouz	21.9	11.2	14.3	4.1	0.8	0.2	0.2	-	0.4	0.1	46
Banfill y Frias	18.05	10.14	19.82	2.58	0.55	0.25	0.25	0.33	0.26	0.1	47.62
Garcia et al.	18.1	10.14	19.82	2.58	0.55	6.25	6.25	0.33	0.26	0.1	47.63
Frias et al.	10.79	6.82	25.43	0.86	0.46	0.13	0.13	0.33	0.28	0.13	54.34
Melo et al.	13.03	10.8	38.76	0.56	0.32	0.08	0.08	-	0.24	0.08	40.79
Yan et al.	6.97	6.9	9.37	0.11	0.38	0.14	0.14	-	13.2	0.06	58.8
Frias et al.	10.69	6.74	24.15	0.26	0.41	0.24	0.24	0.3	0.21	0.16	55.71

Fuente: *Frías, Rodríguez and Sánchez De Rojas 2015*

Adicional se puede caracterizar otros elementos mineralógicos: calcita, caolinita y filosilicatos (talco, mica) y cuarzo (Frías et al., 2011). Estos elementos proveen características puzolánicas que son útiles para los procesos de fabricación de material de construcción. Por lo cual se han realizado estudios a partir de la calcinación del papel para la producción de ladrillos con residuos de papel generando un aumento en la resistencia a la compresión y una disminución de la densidad y la conductividad térmica que garantiza una menor pérdida de calor la cual es requerida para la construcción de edificaciones con menor perdida de energía (Sutcu & Akkurt, 2009).

Una segunda alternativa en el ámbito de la construcción son paneles prefabricados, en la actualidad contienen 80% cemento y 20% yeso el porcentaje de cemento fue remplazado por lodos papeleros con un porcentaje de humedad del 45%, se estudió la efectividad de esta mezcla para el cumplimiento de las normas ASTM. En el estudio se evaluaron propiedades como resistencia, dureza, densidad, deflexión, entre otras y se determinó que de lodo se da cumplimiento a la normatividad sin sufrir daños teniendo como punto a favor la disminución en el peso de los paneles diseñados en comparación con los actualmente comercializados ya que permite facilitar el transporte y armado de estructuras (Quinchía et al., 2007).

Para el caso de cementos, estudios concluyen que dadas las características fisicoquímicas y la presencia de caolita los lodos de papel activados térmicamente a temperaturas entre los 650-700ºc se transforman en meta caolinita y esta es altamente puzolánica [8]propiedad que se requiere em la producción de cemento, lo que generaría una disminución en el impacto económico y medio ambiental por la extracción convencional de la caolita de los minerales arcillosos (Frías et al., 2011)

La adición de residuos de lodos papeleros ha mostrado similitud o mejoría en las propiedades físicas del mortero[9] como la absorción de agua, la densidad y la perdida por abrasión, sin embargo, la investigación mostro que la mezcla 2.5% de lodos, actúa como retardante en el tiempo de fraguado y representa una disminución en la densidad aparente por lo que debido a que no afectan en mayor proporción las propiedades mecánicas y físicas (Yan et al., 2011).

Debido al alto contenido de agua (40-70%) del residuo de lodo pueden ocasionar problemas en la manipulación o incineración razón por la cual deben ser secados antes del procesamiento (Frías et al., 2015). Según literatura el porcentaje de humedad para la utilización de estos debería estar entre el 10-15% (Colomer et al., 2009; Monte et al., 2009).

La reutilización de los lodos en la producción de cemento toma fuerza al ser este uno de los materiales más usados en el mundo actual y con un crecimiento del sector en Colombia según los estudios realizados para el 2019 por la Dirección de investigaciones económicas, sectoriales y de mercados del grupo Bancolombia debido al aumento en: las obras civiles que impulsan la demanda (4.9 a/a), importaciones (+217 a/a), licencias de construcción (107.7%).

Según estudio publicado por la revista La República en el año 2019 realizado por el DANE acerca de la capacidad instalada de mercado de cemento en Colombia, se presenta la empresa ARGOS con una producción de 8.7 millones de toneladas para el año 2019 lo que representa una oportunidad de reutilización de lodos importante por el volumen de producción que genera esta cementera. Adicional se tiene una relación de materia prima de 1.6 toneladas requeridas para la obtención de una tonelada de cemento (Carneado Moreno, 2009), información que puede ser útil para identificar el volumen que podría requerirse en caso de sustituir parte de la materia prima por los lodos resultantes del proceso de fabricación de cartón.

[8] Puzolánica: capacidad que tiene un material para reaccionar con el hidróxido de cálcico en medio acuoso para formar compuestos que poseen propiedades cementantes

[9] Mortero: Mezcla de diversos materiales, como cal o cemento, arena y agua, que se usa en la construcción para fijar ladrillos y cubrir paredes.

6.2.2. *Fabricación de productos en la industria papelera a partir de lodos de papel*

Los lodos papeleros para la industria ha sido un problema desde el inicio, ya que este tipo de residuo no se le ha podido dar un uso y su disposición ha sido un dolor de cabeza para las plantas ya que los espacios en los rellenos de nivelación y vertederos es menor cada día y por regulaciones ambientales se vuelve más costoso cada día, en el sector papelero se ha estudiado varios posibles usos para su reutilización.

A manera de reinserción en el proceso productivo de los molinos papeleros existen estudios que demostrado que esto puede ser posible en pequeños porcentajes máximo el 3% y la adición de otros productos que ayuden a compensar la falta de fibras largas y los residuos que contienen los lodos que nos son aprovechables para la fabricación de papel, para esto sea posible se debe iniciar un nuevo proceso para la recuperación de estos lodos y poder utilizarlo como materia prima en la fabricación de papel Kraft. Para dicho proceso se deben adicionar barredores de carga que le aportan una alta carga aniónica y una baja carga catiónica (Huber et al., 2014), este proceso es utilizado para poder retirar la basura de los lodos dejando las fibras en la superficie y los residuos no aprovechables en el fondo del tanque, para compensar dicho desbalance se deberá adicionar almidón catiónico (almidón de maíz), el cual ayudara a enlazar la fibra que contiene el lodo para la formación de una lámina de papel. Pero dicho proceso puede interferir en el indicador de retención de humedad y en el índice STC (índice de resistencia a la compresión) y esto sumado a la cantidad de almidón agregado al proceso puede elevar los costos de fabricación de papel si no se tiene un buen balance de cargas, por lo que es recomendable este tipo de prácticas , se debe tener en cuenta que la materia prima utilizada por Empacor es 100% reciclada a diferencia de las plantas mencionadas en el artículo (Huber et al., 2014) en donde se realizan en plantas europeas que utilizan cierto porcentaje de material virgen en sus procesos de fabricación .

Un uso interesante y que se encuentra dentro de la misma compañía es la reutilización de dichos lodos para la fabricación de bandejas para huevos que se fabrican por moldeado de pulpa sobre un molde, en esta fabricación se puede tomar en cuenta las recomendaciones realizadas en la revista (Huber et al., 2014) ya que dada el volumen de la producción actual de la planta (90.000 kg/ mes) y 1.226.000 bandejas por mes, podría ser una opción viable manteniendo máximo el 3% de utilización dentro del proceso productivo con una humedad del 35%, con un costo de 380 pesos en promedio por kilogramo.

Para esta planta en la actualidad el consumo de papel se da de la siguiente manera, 54 %de plegadiza y 46% de refile, dicha combinación de papel permite dar una estructura rígida y fuerte a las bandejas para que el huevo sea completamente soportado cuando se apilan en varias unidades, además también permite un mejor transporte evitando roturas del producto. (**ver anexo 2**).

Como formulación deseada en la planta de cubetas incorporando el lodo, estaríamos hablando que la formulación por bache se dará como 53% de plegadiza, 45% de refile y

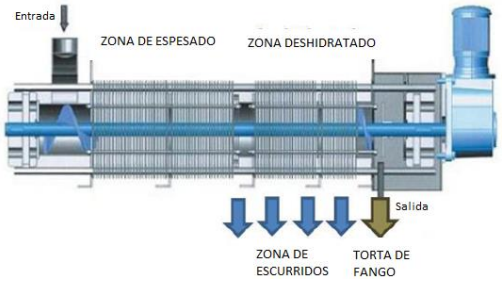
3% de lodos secos, esta formulación permitirá la reutilización de los lodos dentro del producto generando beneficios como poder alojar las fibras cortas del papel entre las fibras largas de la pulpa, logrando mejorar el vacío y drenabilidad del agua en el proceso de formación de la bandeja, disminuir el consumo de refile(material vital dentro del proceso de fabricación de papel), al tener las bandejas un menor volumen de agua gracias al mejoramiento del vacío se optimizara el secado de las bandejas en los hornos ahorrando combustible.

Las propiedades requeridas para poder ser insertadas en cualquiera de los dos procesos son expuestas en el artículo (Ochoa de Alda, 2008) en donde se tienen como principales características de los lodos los siguientes parámetros:

- El porcentaje de humedad.
- Contenido de cenizas
- pH
- Drenabilidad

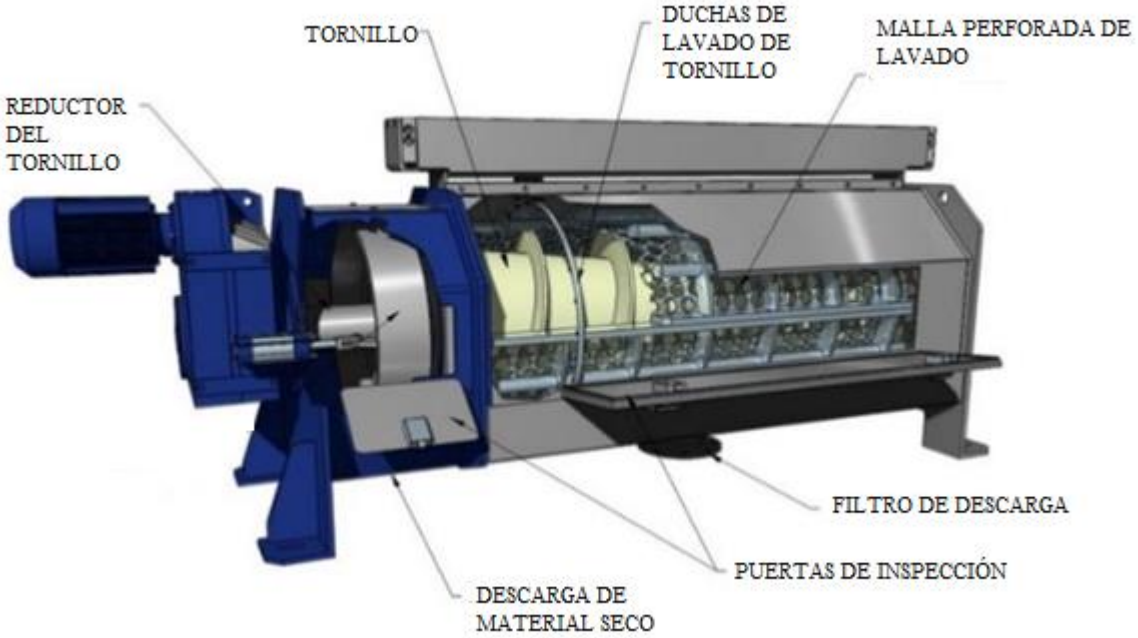
Una tercera alternativa dentro del proceso productivo de Empacor es disminuir el porcentaje de humedad de los lodos, lo que permitiría disminuir el peso del lodo por disposición, logrando un ahorro solo por disposición en rellenos o vertederos, este tipo de lodos secos podría permitir abrir una serie de nuevas aplicaciones para su reutilización ya sea dentro de la compañía generando una nueva línea de negocio y/o poder venderlos o donarlos a otros procesos productivos que requieren que estos lodos provengan con condiciones de humedad muy bajas. Para lograr realizar este tipo de deshidratación los lodos deberán sr sometidos a un proceso térmico como un equipo que se muestra en las figuras 23 y 24.

Figura 23. *Esquema interno de ciclo de secado*



Fuente: *Customized Environmental Tanning Sludge Drying Plant For Export - Buy Secado De Lodos De La Planta De Secado Planta Secador De Lodo Product on Alibaba.com*

Figura 24. *Partes de equipo de secado rotativo*



Fuente: *Customized Environmental Tanning Sludge Drying Plant For Export - Buy Secado De Lodos De La Planta De Secado Planta Secador De Lodo Product on Alibaba.com*

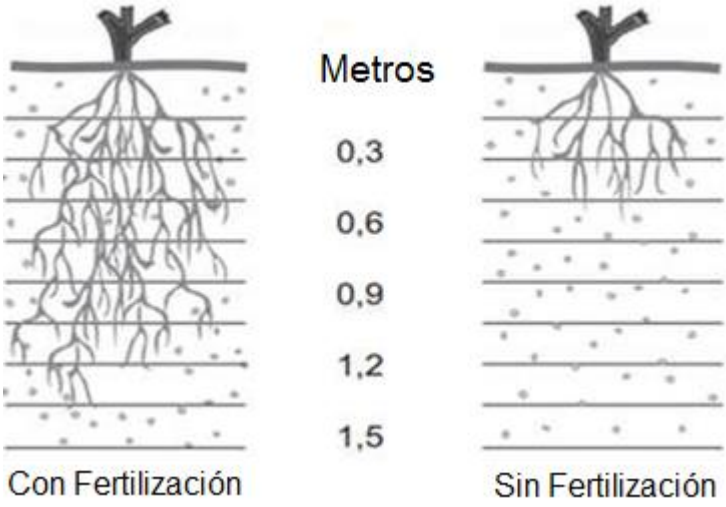
Como combustible de secado de este equipo se pueden aprovechas los retornos de condesados del molino papelero cuyas temperaturas oscilan entre los 120 y 90 °C. estos equipos son de fácil utilización, bajos costos de operación y mantenimiento, operación 24 horas y de tamaño pequeño que puede ayudar a mejorar el proceso de manipulación de lodos.

6.2.3. *Aprovechamiento de lodos de papel en compostaje*

Esta alternativa se viene estudiando desde hace mucho, dadas las características que presentan los lodos generados en la industria del papel. Los lodos se pueden reutilizar en técnicas de compostaje y de esta forma generar una alternativa a la disposición final. (Hackett et al., 1999)

El crecimiento poblacional abre un mercado importante en la necesidad de fertilizantes para los suelos y plantas las cuales se ven altamente beneficiadas con su uso. Figura 25.

Figura 25. *Profundidad de las raíces de plantas con y sin fertilización*



Fuente: (Latorre-Malaver & Cote-Alarcon, 2020)

El compostaje como definición es una biooxidación aerobia exotérmica de un substrato orgánico que se caracteriza por la producción de CO2 (Negret, 2018).

Es una técnica que busca la degradación de materia orgánica con características no útiles para convertirla en un producto útil y con buena fuente de carbono, nitrógeno principalmente. El compostaje puede ser producido de diferentes formas pero con una finalidad que es producir un fertilizante apto para plantas y cultivos en el sector agrícola, la descomposición se puede dar por un procesos aerobio y anaerobio para lo cual se necesitan diferentes condiciones y técnicas de producción, se puede separar por etapas en las cuales la materia prima se va transformando en el producto final que es el compost, estas etapas se dividen en: preparación en la cual se evalúa la materia prima se fijan los estándares de humedad y la relación entre el Carbono y el Nitrógeno a partir de esto se pasa a la siguiente etapa que es la descomposición mesófila en la cual dadas las condiciones de temperatura y pH hay proliferación de organismos mesófilos los cuales ayuda en la transformación de compuesto como azucares y aminoácidos, se continua con la etapa de descomposición termófila en la cual el aumento de temperatura llegando a los 60°C permite el crecimiento de organismos termófilos y estos a su vez se encargan de la transformación de Nitrógeno en Amoniaco, a continuación sigue la etapa de descomposición mesófila de enfriamiento en la cual se disminuye la temperatura y nuevamente hay crecimiento de organismos mesófilos los cuales se encargarán de descomponer compuestos como la celulosa, el proceso continua con la etapa de maduración y es donde el compost adquiere características propias del producto, finalmente se termina con la etapa de afinación en esta parte del proceso se realiza el control de calidad revisando parámetros como granulometría y partes no descompuestas para finalmente obtener un producto apto para uso en agricultura (Negret, 2018).

Según estudios realizados los lodos de papel cumplen con las características principales para ser utilizados como materia prima para la generación de compost. En el mundo aproximadamente el 14% de los lodos de papel son utilizados para la generación de compostaje y en Colombia se tiene que alrededor del 7% tiene como destino final de disposición el compostaje y fertilizantes. (Latorre-Malaver & Cote-Alarcon, 2020)

Recientes estudios afirman que gracias a las propiedades físico químicas es posible realizar mezclas sin tratamiento previo del lodo con los desechos provenientes de galpones como lo es el estiércol de pollo, entre sus características encontramos que los lodos no son un desecho peligroso, se pueden usar entre el 50 y 70% de humedad, alto contenido de materia orgánica, celulosa entre otros. La mezcla entre el lodo de papel y el estiércol de pollo busca la relación ideal de carbono y nitrógeno pero para esto primero se requiere de una técnica de mezcla y aireación la cual permite el secado y la acción de bacterias aerobias encargadas de la transformación de nitrógeno.(Latorre-Malaver & Cote-Alarcon, 2020)

La proporción ideal entre el carbono y el nitrógeno debe ser alrededor de 15:1 y 35:1 los resultados arrojados muestran este el rango óptimo para la generación de un compost de calidad y que tarde en promedio entre 35 y 40 días su preparación. (Latorre-Malaver & Cote-Alarcon, 2020)

Esta opción de disposición final claramente ayuda con el medio ambiente y lo favorece de las siguientes formas, primero que todo disminuyendo la cantidad de lodos de papel que terminan en un relleno sanitario y segundo al ser una materia prima para un abono más natural se disminuye el uso de fertilizantes sintéticos los cuales también tiene su propio impacto sobre el medio ambiente. (Beauchamp et al., 2002)

Una desventaja de esta opción de disposición es que se tiene que mensualmente se producen 1017 toneladas de compostaje para lo cual se requiere alrededor de 2700 toneladas de materia prima, si se analizan los números con detalle y evaluando la cantidad de lodos producidos mensualmente por empresas como Empacor S.A. se puede ver claramente que la cantidad de lodo usados en esta alternativa es baja por tanto esto hace que no tenga mayor posibilidad de estudio y aplicación, más sin embargo por su facilidad de aplicación con sus propiedades físico químicas y sin tratamiento previo, muestra que es una opción viable (Negret, 2018).

La producción de compostaje maneja diferentes fuentes de materia prima por tanto su precio puede ser variable, se encuentra entre 100 y 300 pesos el kilo, para la utilización de los lodos de papel, Empacor S.A. podría regalar estos lodos por tanto su costo estaría relacionado con el transporte de los mismos, dado que algunas empresas se encuentran dentro de Bogotá y otras se encuentran a las afueras se estima que el costo de transporte estaría entre 150 mil pesos y 200 mil pesos por tonelada, esto implicaría un posible ahorro o en su defecto no tendría un sobre costo si se considera la opción de utilización de lodos de papel en la producción de compostaje orgánico (Negret, 2018).

El costo de disposición de los lodos como se ha mencionado es de 28 pesos el kilo por tanto Empacor S.A. si se usa esta alternativa se estaría aumentando su margen en aproximadamente 60 millones de pesos al año.

6.2.4. *Aprovechamiento de lodos como combustible secundario para generación de energía*

El tratamiento térmico de residuos es un método que se está volviendo más atractivo como una opción de eliminación. La combustión puede destruir componentes peligrosos patógenos y orgánicos (Vamvuka et al., 2009), igualmente puede de forma significativa e inmediata, reducir la masa y el volumen de estos desechos, además de permitir la recuperación de energía que es de vital importancia ante la crisis energética en todo el mundo.

La posibilidad de una combustión conjunta de residuos sólidos (combustibles secundarios), como lodos de papel con carbón en centrales eléctricas, puede ser una opción interesante, ya que permite el uso de infraestructuras ya equipadas con dispositivos adecuados para el control de emisiones, reduciendo al mismo tiempo el consumo de combustibles fósiles.

Todos los combustibles con características por fuera de las especificaciones del carbón convencional se pueden agrupar en la definición genérica de combustible secundario (Biagini et al., 2004).

Sin embargo, para la co-utilización[10] de lodos con carbón, puede ser necesario modificar el sistema de conversión considerado junto con otros factores. Por tanto, es especialmente interesante conocer de antemano el comportamiento de estos combustibles durante tratamiento, no solo por separado sino también juntos. Las interacciones que puede ocurrir entre ellos pueden afectar la eficiencia general del proceso.

Además, el buen funcionamiento de las unidades de co-combustión[11] depende de la capacidad de controlar y mitigar los problemas relacionados con las cenizas, que puede reducir la eficiencia, capacidad y disponibilidad de las instalaciones, aumentando así el costo de la energía. Tales problemas incluyen incrustaciones, escorias, corrosión de equipos y emisiones contaminantes.

El uso de combustibles secundarios reduciría el consumo de combustibles fósiles, cuyos depósitos están destinados a agotarse, un proceso que inevitablemente conducirá a costos mayores.

[10] co-utilización: Utilizar de manera conjunta dos productos.
[11] co-combustión: Consiste en la combustión conjunta de dos combustibles en un mismo dispositivo.

Una de las características a tener en cuenta en el lodo es el poder calorífico. Se define el poder calorífico de un combustible como la energía liberada por unidad de peso cuando el combustible se quema con oxígeno.

De acuerdo con el estudio de (Colomer et al., 2009) los lodos provenientes de una planta de tratamiento de aguas residuales de una fábrica de papel, aumentan su poder calorífico considerablemente en estado seco, de acuerdo con la siguiente tabla 10.

Fuente: *(Colomer et al., 2009)*

% Humedad	Poder Calorífico en húmedo (kcal/kg)	Poder Calorífico en seco (kcal/kg)
56.29	1283.82	3511.49

Tabla 10. *Poder calorífico de los lodos*

Este valor del poder calorífico del lodo seco corresponde a un lodo cuyo % humedad es del 10%. Este contenido de humedad es la cantidad máxima permitida en una planta de incineración.

La composición química analizada de estos lodos corresponde a la descrita en la tabla 11.

Fuente: *(Colomer et al., 2009)*

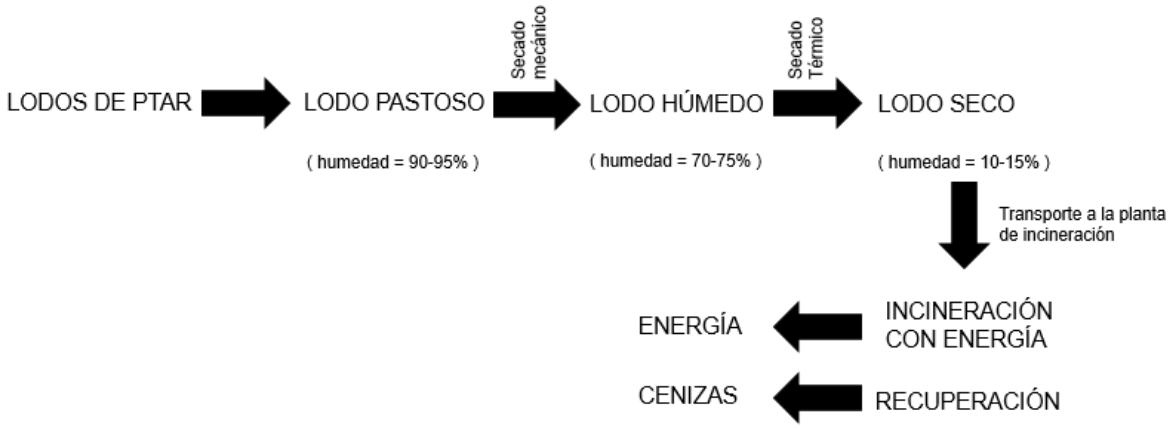
%C	%H	%O	%N	%S
37.17	4.46	28.97	1.29	0.35

Tabla 11. *Composición química de los lodos*

De acuerdo con un análisis comparativo del peso de combustible necesario para generar 1800 kWh en una central eléctrica es 1421.8 kg de lodo seco. La tasa de eficiencia dependería de la central eléctrica. Si este valor calorífico se utilizara en un horno de cemento, se podrían fabricar unos 5000 kg de Clinker. (Colomer et al., 2009).

Para la obtención del lodo seco, en el siguiente diagrama se describe el procedimiento recomendado para el pretratamiento del lodo.

Figura 26. *Procedimiento recomendado para lodos de diferentes plantas de tratamiento de aguas residuales.*



Fuente: (Colomer et al., 2009)

Según la figura 26, el prensado y secado térmico permiten extraer el agua intracelular de los lodos mediante calor externo. El lodo resultante mantiene el contenido de sólidos, pero su humedad se ha reducido entre el 10-15%. Ahora bien, los lodos secos son más fáciles y económicos de transportar, ya que su peso disminuye entre un 70% y un 75% (L. Ochera, 2003).

Por su parte (Vamvuka et al., 2009) estudio la posibilidad de utilizar lodo de papel en aplicaciones de cocción. Según dicho estudio al mezclar un lodo de una fábrica papelera, un carbón subbituminoso, con un porcentaje de biomasa del 10%, que es típico de las aplicaciones de cocción en la industria europea, los parámetros cinéticos de la mezcla no cambian significativamente en comparación con los calculados para el subbituminoso carbón de manera individual de acuerdo como se muestra en la siguiente tabla 12.

Fuente. (Vamvuka et al., 2009)

Muestra	Material Volatil %	Carbono Fijo %	Cenizas %	C%	H%	N%	O%	S%	Poder Calorífico Bruto (MJ/kg)
Lodo Papelero	47.7	1.3	51.0	23	2.8	1.7	21	0.1	7.1
Carbon Subbituminoso	49.7	44.7	5.6	65	5.8	0.8	23	0.3	24.6
Carbon Sub/ Lodo Papelero	49.2	39.7	11.1	59	5.1	0.9	24	0.3	22.1

Tabla *12.* *Aplicaciones de cocción*

El lodo de papel es un combustible pobre, ya que su contenido de ceniza es elevado y, por tanto, disminuye su valor calorífico. Sin embargo, la ceniza de lodo de papel no pareció

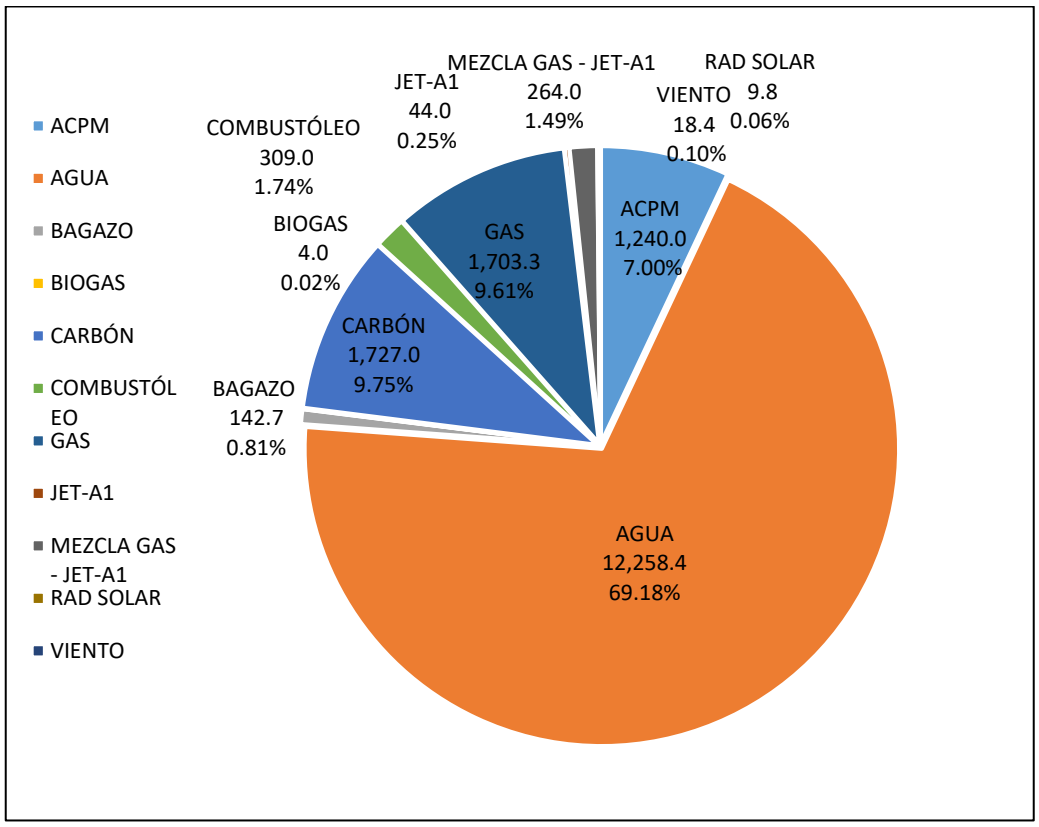
tener un efecto negativo desde el punto cualitativo de vista, su cantidad es alta y se ha demostrado que obstaculiza el proceso. Por lo tanto, si se aplica un método de beneficio económico para reducir su cantidad antes de la combustión, el poder calorífico y la tasa de combustión aumentará drásticamente y se mejorará la eficiencia del proceso. (Vamvuka et al., 2009).

Dada la información anterior, la opción de utilizar el lodo proveniente de la planta de tratamiento de aguas residuales de Empacor como combustible secundario es viable, y la posibilidad de una combustión conjunta con el carbón sería una alternativa a considerar debido a la relativa cercanía con algunas centrales térmicas cuyo recurso para la generación de energía es el carbón.

Según los reportes estadísticos de la UPME (Unidad de planeación minero-energética) de agosto 2018, las centrales hidroeléctricas tienen la mayor participación en cuanto a generación de energía, con 69.18% de la capacidad instalada total. En segundo lugar, se ubican las centrales térmicas (gas, carbón y ACPM), las cuales alcanzan de manera agregada el 26.36%.

De este 26.36%, las centrales térmicas cuya tecnología o recurso utilizado es el carbón equivalen a un 9.75% según se observa en la figura 27.

Figura 27. *Participación por tecnología en la matriz eléctrica.*



Fuente: (UPME, 2018).

Existen 2 centrales eléctricas relativamente cerca de Bogotá D.C., una de ellas es la central térmica Termozipa, y la otra es Termopaipa.

La Central Termoeléctrica Termozipa ubicada en Tocancipa – Cundinamarca, genero 594,000 MWh-año en el 2019. Esta Central consta de cuatro unidades de carbón que también pueden usar fuel oíl como combustible auxiliar. El consumo de carbón en el año 2019 fue de 297.000 ton, este reporte corresponde al consumo de 2 centrales térmicas del grupo Emgesa, Termozipa y Cartagena. La capacidad instalada en la planta Termozipa es 18% más que la de Cartagena, lo que supone un consumo de carbón de 161.815 Ton en el año 2019 para la Central Termozipa (ENEL Emgesa, 2019).

Por su parte, la Central Termoeléctrica Termopaipa propiedad de GENSA, es una planta de generación de energía eléctrica a base de vapor, para cuya producción se utiliza como único combustible carbón y está ubicada en el Kilómetro 3 vía Paipa – Tunja, Municipio de Paipa, Departamento de Boyacá; La generación de energía del año 2019 (MWh-año) de las unidades I, II y III representó un total de 680,457 MWh-año, lo que significa una variación del 58,04%, respecto al año 2018. Las unidades operan basadas en vapor generado a través de la combustión de carbón bituminoso pulverizado.

El consumo de carbón de esta termoeléctrica de las unidades I,II y III fue en el 2019 de 505.178,2(Ton-año) y tuvo un incremento del 68.43% en relación al año 2018 que estuvo en 299.931,2(Ton-año) (GENSA, 2020).

Como se puede observar, el consumo de Carbón en las centrales eléctricas es elevado, y no es una fuente de energía infinita, por lo tanto su uso está limitado por la disponibilidad de las reservas y/o por su rentabilidad económica.

Frente al criterio ambiental, entre las opciones de conversión térmica, la co-combustión de los lodos de las fábricas de papel junto con el carbón en las infraestructuras existentes puede ser una opción interesante, ya que estas instalaciones ya están equipadas con los dispositivos adecuados para el control de emisiones.

Según el informe de sostenibilidad del año 2019, la Central Termozipa realizo paradas programadas para la instalación de nuevos quemadores con ultra bajas emisiones en NOx, además se mostró cumplimiento de las pruebas legales de emisiones para las Unidades 4 y 5 con resultados satisfactorios gracias a los controles operacionales establecidos por la Central, y luego de las intervenciones del proyecto de Extensión de Vida Útil y mejora en el desempeño ambiental (ENEL Emgesa, 2019).

6.3. Proceso analítico de jerarquización para la elección alternativa de reutilización de lodos

Para la elección de la mejor alternativa para reutilización de lodos se hace uso del proceso analítico de jerarquización, el cual se describirá a continuación:

Inicialmente se estableció el objetivo el cual era determinar la mejor alternativa para la reutilización de los lodos generados durante el proceso de producción de cartón en la empresa Empacor y evitar la disposición en rellenos sanitarios disposición que actualmente se está manejando. Los criterios a tener en cuenta para el análisis son: %Humedad (HU) requerida en el proceso en que se va reutilizar el lodo, el grado de requisición de tratamiento previo para su reutilización (TP), % reutilización lodo (RL) y % aumento en el margen de la empresa Empacor S.A(AM). Las alternativas a considerar son de reutilización en: A) Producción cemento, B) fabricación cubetas de huevos, C) generación energía y D) compostaje.

Los datos de los criterios a evaluar para cada una de las alternativas fueron tomados de las investigaciones realizadas y se describen en la **Tabla 13**

	ALTERNATIVAS			
CRITERIOS	**A**	**B**	**C**	**D**
%HU	10%	35%	10%	60%
TP	REQUIERE TRATAMIENTO PREVIO BAJO	NO REQUIERE TRATAMIENTO PREVIO	REQUIERE TRATAMIENTO PREVIO MODERADO	NO REQUIERE TRATAMIENTO PREVIO
%RL	2.5%	3%	10%	7%
%AM	100%	0%	100%	30%

Tabla 13. *Información recolectada de las alternativas por criterio*

En este punto es importante aclarar cómo se determinó el % AM ,para este criterio se tomaron como referencia los valores reportados por empresas claves del sector, sobre el gasto de materia prima como se describió en las investigaciones y teniendo en cuenta el porcentaje de reutilización de lodos se estimó la cantidad de lodos que podría reutilizarse, con esta información y teniendo como base el valor que Empacor S.A paga por la disposición de lodos se determinó cuanto de este valor porcentualmente disminuiría debido a la cantidad de lodos que necesitaría. Es decir que nuestro 100% correspondería a la utilización de las 638 toneladas mensuales que genera un valor que eliminaría el costo mensual (17.8 millones de pesos).

Continuando con la aplicación del AHP ya teniendo el objetivo y criterios se realizó la comparación pareada de los criterios, consultando con la empresa Empacor S.A y utilizando la escala planteada en la Tabla 8. Los resultados se muestran en la Tabla 14, posteriormente se obtuvo el vector propio que representa el vector de prioridades de cada criterio según el método de aproximación (Pacheco & Contreras, 2008), presentado en la **Tabla 15**

CRITERIOS	%HU	TP	%RL	%AM
%HU	1	1/3	1/5	1/7
TP	3	1	1/3	1/5
%RL	5	3	1	1/3
%AM	7	5	3	1

Tabla 14. *Comparación pareada por criterios.*

CRITERIOS	PESO
%HU	0.053
TP	0.115
%RL	0.265
%AM	0.567

Tabla 15. *Pesos de los criterios*

El peso de los criterios fue determinado en concordancia con lo expuesto por los líderes de la Empresa Empacor S.A se planteó que el objetivo como para cualquier compañía es generar una disminución en sus costos inicialmente tomando el tema financiero como el más relevante sin dejar a un lado el interés que se tenía con disponer los lodos de una manera aprovechable en otros procesos y no impactando directamente al medio ambiente. Razón por la cual se evidencia que el criterio %AM , se otorgó el mayor peso al ser un criterio que beneficiaría a la compañía y como segundo criterio el %RL ya que al tener mayor cantidad de lodo a reutilizar se dispondría menos en vertederos.

Para determinar la consistencia de los juicios establecidos se halló la proporción de consistencia conforme a las figuras 19,20,21 y tabla 9 donde la relación de consistencia resulta ser cero teniendo en cuenta los resultados obtenidos:

$$\lambda \max = 4$$

$$CI = 0$$

$$RC = \frac{0}{0.9} = 0$$

Por lo cual según lo indicado si el valor era inferior a 0.1 no era necesario reevaluar los juicios presentados en la matriz.

Para continuar con el proceso se realizó una homologación de los parámetros cuantitativos y cualitativos de los criterios a evaluar de manera que estén representados bajo la misma escala, como se presentan a continuación:

%HU		
INDICADOR CUANTITATIVO	**INDICADOR CUALITATIVO**	**CORRELATIVO NUMERICO**
59-70%	ALTO	5
47-58%	MEDIO ALTO	4
35-46%	MEDIO	3
23-34%	MEDIO BAJO	2
10-22%	BAJO	1

Tabla 16. *Escala homologación criterio % humedad*

TP		
INDICADOR CUANTITATIVO	**INDICADOR CUALITATIVO**	**CORRELATIVO NUMERICO**
NO REQUIERE TRATAMIENTO PREVIO	ALTO	5
REQUIERE TRATAMIENTO PREVIO BAJO	MEDIO ALTO	4
REQUIERE TRATAMIENTO PREVIO MODERADO	MEDIO	3
REQUIERE TRATAMIENTO PREVIO MEDIO ALTO	MEDIO BAJO	2
REQUIERE TRATAMIENTO PREVIO ALTO	BAJO	1

Tabla 17. *Escala homologación criterio grado de requisición de tratamiento previo*

%RL		
INDICADOR CUANTITATIVO	**INDICADOR CUALITATIVO**	**CORRELATIVO NUMERICO**
8.1-10%	ALTO	5
6.1-8%	MEDIO ALTO	4
4.1-6%	MEDIO	3
2.1-4%	MEDIO BAJO	2
0.1 -2%	BAJO	1

Tabla 18. *Escala homologación criterio % reutilización lodo*

AUMENTO EN EL MARGEN DE LA EMPRESA		
INDICADOR CUANTITATIVO	**INDICADOR CUALITATIVO**	**CORRELATIVO NUMERICO**
81-100%	ALTO	5

61-80%	MEDIO ALTO	4
41-60%	MEDIO	3
21-40%	MEDIO BAJO	2
0-20%	BAJO	1

Tabla 19. *Escala homologación criterio % aumento margen de la empresa*

Finalmente, con la estandarización y homologación de los parámetros de los criterios que se realizó anteriormente se procedió a multiplicar el valor asignado según las escalas anteriores por el valor ponderador para cada criterio en cada una de las alternativas. La tabla 20 muestra el orden jerárquico final de las alternativas:

ALTERNATIVA	VALOR PONDERADO
C	4.56
A	3.88
B	3.03
D	1.83

Tabla 20. *Ponderación final alternativas jerárquicamente*

Se estableció la alternativa con mayor valor como la seleccionada o preferida para dar solución al problema, para este caso la alternativa C que hace referencia a la reutilización de lodos en la generación de energía.

7. Conclusiones

7.1. Aprovechamiento Energético

Mediante esta alternativa es posible valorizar los residuos de lodos de la Empresa Empacor S.A. Al mezclar este lodo con carbón subbituminoso[12], con un porcentaje de biomasa del 10%, que es típico de las aplicaciones de cocción en la industria europea, los parámetros cinéticos de la mezcla no cambian significativamente en comparación con los calculados para el subbituminoso carbón de manera individual (Vamvuka et al., 2009).

Ahora bien, el porcentaje de biomasa[13] pudiese aumentar al 20% o 30% dependiendo del % de humedad que tenga el lodo en el momento de la aplicación, pues entre más seco el lodo, su poder calorífico es mayor y favorece la combustión. Sin embargo, ambientalmente no están recomendable dado que las concentraciones de NO_x y SO_2 en los gases de combustión son

[12] Carbón subbituminoso: carbón con calidades del carbón bituminoso y el lignito.
[13] Biomasa: Toda la materia orgánica susceptible de ser utilizada como fuente de energía.

linealmente dependientes del contenido de nitrógeno y azufre en el combustible y aumentaban con cantidades crecientes del lodo en las mezclas (Grimm et al., 2019).

Además, el funcionamiento exitoso de las unidades de co-combustión depende de la capacidad de controlar y mitigar los problemas relacionados con las cenizas, que pueden reducir la eficiencia, capacidad y disponibilidad de las instalaciones, aumentando así el costo de energía (Vamvuka et al., 2009).

Al considerar esta alternativa, la opción más viable para su reutilización como co-combustible seria en la Central Térmica Termozipa en Tocancipá, dado su cercanía a la capital. De acuerdo con lo descrito en el documento, en esta central se consumió 161.815 Toneladas de carbón en el año 2019.

En dicha Central, para alcanzar una mezcla de biomasa del 10% se necesitarían 16,182 Toneladas de lodo al año, sin embargo, la empresa Empacor apenas genera 7,656 Ton/año de estos residuos. Con este nivel de residuos, teóricamente alcanzaría para ajustar mezclas de biomasa de aproximadamente 4.7%, siempre y cuando el lodo cumpla con las características antes descritas de secado.

Respecto al ámbito económico, el ahorro que pueda tener la Central Térmica en relación con la compra del carbón tendría un margen de ganancia. Aunque no se conoce con exactitud el precio promedio del carbón ($/Ton) para esta empresa, podemos tomar como referencia el precio promedio del carbón ($/Ton) para la Central Térmica Termopaipa según el informe de sostenibilidad del grupo GENSA del año 2019. Este informe, considera un precio de 132.871 ($/Ton), lo que supondría un ahorro económico para la Central de aproximadamente 1,017 millones de pesos anuales incorporando el 100% de los lodos dentro de su proceso.

Para Empacor S.A., significaría un aumento en el margen de utilidad aproximado de 215 millones anuales, dado que el precio por disposición kg de lodos es $28.

El porcentaje de lodos que describe la literatura (28%) (López, 2014) para el aprovechamiento energético interno de la compañía es a nivel internacional, y no aplica literalmente en Empacor S.A. debido a que no se cuenta con la maquinaria necesaria para transformar estos lodos en energía directa y ya se cuenta con un plan de reutilización de vapor industrial con el cual se hace el secado en la línea de producción del papel. Este podría ser objeto de estudio en otro proyecto evaluando su relación costo beneficio dadas las ventajas y cualidades que se puedan tener para este uso.

Para la compañía en este momento y con las instalaciones actuales la opción más viable en costo beneficio es la de llevar estos lodos para aprovechamiento energético en otra compañía donde se utilizarían el 100% de los lodos que saca la empresa mensualmente.

7.2. Aprovechamiento como materia prima en Empacor S.A

Dentro de las opciones escogidas por medio de la matriz multicriterio, la utilización del lodo como materia prima para la fabricación de cubetas para huevos, aunque no fue la alternativa con mayor ponderación, podría ser para la compañía de gran ayuda en la disminución de costos

por la sustitución de materia prima en la incorporación de lodos. Esta alternativa gana relevancia, porque se dejarían de comprar mensualmente 3.000 kg de papel que sería reemplazados por el lodo proveniente de la fabricación de papel Kraft, esto basado en el porcentaje a reemplazar que según las investigaciones (Huber et al., 2014) sería el 3% del total requerido por la empresa mensualmente cuyo valor es de 90.000 kg

La planta de cubetas tiene perspectivas de crecimiento por lo que este valor actual puede incrementar y el ahorro puede ayudar al crecimiento esperado de la planta.

El trasporte de la materia prima no generaría un costo adicional debido a que la planta de cubetas se encuentra dentro del mismo complejo industrial y el almacenamiento tampoco sería un problema. Lo único que se debe garantizar es que el porcentaje de humedad de los lodos debe ser máximo del 35%. Como beneficio adicional en el proceso de fabricación de cubetas, la utilización de lodos en la formulación de fabricación ayudará a cerrar los espacios entre el entrelazamiento de las fibras lo cual permitirá mejorar en vacío en los moldes de fabricación de las cubetas, permitiendo mejorar la formación y calidad del producto.

La recomendación es implementar la utilización de estos lodos dentro de la formulación de fabricación de las cubetas para huevos que la compañía actualmente produce.

7.3. Compostaje

En Bogotá y sus alrededores hay cerca de 6 fábricas de compostaje, según datos obtenidos de sus páginas web pueden tener plantas de producción con capacidad entre 30 mil y 50 mil toneladas al año esto abre un mercado importante y una gran oportunidad de alianza para suministro de lodos con los cuales sería posible la fabricación de compostaje orgánico. Dados los costos que puede llegar a tener la producción de compost, es una buena opción tanto para Empacor S.A. como para las empresas productoras de compostaje orgánico.

Se dificulta la relación entre precio y cantidad dados los bajos costos de la materia prima útil para el compostaje en este caso se puede conseguir diferentes fuentes de materia prima con valores entre los 100 y 300 pesos el kilo para el caso de Empacor S.A. podría ser útil condonar los lodos de tal forma que la empresa que disponga de ellos para uso en producción se encargue del transporte hacia su destino y en cuanto a la cantidad, tendería a ser aproximadamente entre 2.300 y 3.500 toneladas al año con un margen de utilización del 7%.

Finalmente, el aumento en el margen para Empacor S.A. dados los costos de disposición de los lodos, seria de aproximadamente 60 millones al año.

7.4. Recomendaciones

La empresa Empacor S.A. en primera instancia debería en cuanto se pueda, verificar la composición química del residuo de lodo de papel, debido a que por la pandemia del COVID-19 no fue posible realizar los ensayos en los laboratorios para validar y contrastar dichas características evidenciadas en las investigaciones.

Una de las limitantes para tener en consideración la alternativa de aprovechamiento de lodos como combustible secundario para generación de energía, seleccionada de acuerdo con la matriz multicriterio, es el contenido de humedad de los lodos; Se requiere que el lodo sea utilizado en condiciones secas o de muy baja humedad. (10-15%). Según lo descrito, las diferentes alternativas de aprovechamiento del lodo papelero también en su gran mayoría se necesita un lodo con % bajos de humedad, por lo tanto, la compañía Empacor S.A. debería adoptar un sistema de secado térmico para elevar el potencial de utilización de sus residuos de lodo, según lo descrito en la figura 26.

Se han desarrollado diferentes tipos de técnicas para secar lodos. Los modos principales se pueden dividir en secado por convección, conducción y solar (Bennamoun et al., 2013). Estos métodos de secado requieren de mucha energía y/o tiempo; por lo tanto, el desarrollo de tecnologías eficaces capaces de utilizar el calor residual de baja temperatura de los entornos industriales podría ayudar a reducir los problemas asociados con estos lodos de alto contenido de humedad (Grimm et al., 2019).

Los equipos de secado por convección industrial más común para lodos son los secadores de banda, flash, rotativos y de lecho fluidizado. Es estos equipos, el aire de secado caliente pasa a través de la materia prima, provocando la evaporación del agua por contacto directo. El tipo de lodo y las condiciones del proceso son los factores que influyen principalmente en la cinética de secado (Grimm et al., 2019).

De acuerdo a esto, se realizó una búsqueda de un equipo rotativo de secado por convección que pueda tratar dichos lodos, el cual se describe a continuación.

La empresa Dingli en china fábrica hornos de secado, ofreciendo un amplio portafolio de equipos y gamas. Se resaltan en amarillo las características que se está buscando en el equipo, en la actualidad Empacor tiene un volumen diario de lodos de aproximadamente 20 toneladas día.

7.4.1. *Parámetros técnicos*

Modelo (DLNG)	1412	1615	1916	2218	2518	2522	2823	3430
Capacidad (t/h)	5,4	6,6	13,5	19,8	25,6	31,5	41,4	80,0
Capacidad de humedad de evaporación (t/h)	1,2	1,9	3,0	4,4	5,7	7,0	9,2	17,7
Contenido de humedad de la materia prima (%)	55-60%							
Capacidad de humedad de evaporación (t/h)	20-25% (ajustable)							
Temperatura de secado (°C)	85-100°C							
Total, de la potencia (KW)	65	115	138	170	240	320	450	680
Peso Total (KG)	25000	48000	67000	85000	92000	110000	150000	265000

Área de la planta (M * M)	6 m * 18 m	6 m * 18 m	8 * m 24 m	10 m * 24 m	10 m * 30 m	10 m * 36 m	10 m * 36 m	10 m * 48 m
Excepto los modelos anteriores, también podemos suministrar un modelo especial según sus requisitos.								

Tabla 21. *Características de equipo rotativo de secado Dingli*

El valor cotizado con el equipo resaltado en amarillo que es el que cumple con las características buscadas es de $75.928.113 FOB, se tiene estimado un costo de importación de 1.3% por lo que se estiman los costos de compra y puesta en marcha en el siguiente cuadro.

Se realizó el estudio de inversión y *payback*[14] del equipo el cual dio los siguientes resultados:

[14] Payback: retorno de la inversión en meses.

7.4.2. *Análisis preliminar de inversión de equipo rotativo de secado*

Costo de la adquisicion		19000	USD
Impuestos de importación, costos de despachos y aduanas		24700	USD
Total costo equipo COP	$	95,613,700	
Costo de mano de obra	$	20,512,225	
Costo de instalacion	$	40,000,000	
Inversión total	$	156,125,925	

Ahorro por disminucion del peso del lodo		
Generacion actual de lodos por mes (ton)		638
candidad de lodos por dia (ton)		21
Costo mensual por disposicion de lodos	$	17,900,000
Costo de disposicion de lodo (ton)	$	28,056
Peso de lodos generados despues de la dishidratacion (ton) reducccion del 30%		340
Costo mensual de diposicion de lodos despues de la deshidratacion		9,539,184.95
Ahorro en costo por deshidratacion de lodos por mes	$	8,360,815
Ahorro en costopor disminucion de peso del lodo por año	$	100,329,781

Tasa de cambio	$	3,871	COP
10/03/2020			

payback	18.67

Adicionales			
Millas		5300	
Viajes por milla		0.75	
Costo millas X persona		3975	USD
Costo millas	$	15,387,225	COP
Hotel	$	1,750,000	
Administración 10%	$	175,000	
Mano obra Empacor x 3	$	3,200,000	
Suma costos de mano obra	$	20,512,225	

Tabla 22. *Análisis preliminar de inversión equipo rotativo de secado*

Con una inversión inicial del equipo de $156.125.925 y un payback de 18.67 meses, se nota una viabilidad en la adquisición del equipo que permitiría la extracción de humedad de los lodos y ajustando las características de humedad requeridas en los diferentes procesos analizados.

8. Bibliografía

(CAR/PL), C. de A. R. para la P. L. (2005, September). *Prevención de la contaminacion en el sector papelero*.

Agencia de Proteccion Ambiental de los Estados Unidos. (2020). *Información básica sobre rellenos sanitarios | Vertederos | EPA de EE. UU.* https://www.epa.gov/landfills/basic-information-about-landfills

Ali, T., Jaudat, A., & Ma, H. (2020). A hybrid multi-criteria decision-making approach to solve renewable energy technology selection problem for Rohingya refugees in Bangladesh. *Journal of Cleaner Production*, *273*, 122967. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122967

ANDI - Cámara de la Industria de Pulpa Papel y Cartón. (2017). *Informe de Sostenibilidad Ambiental 2017* (Issue Pecac 2020, p. 123).

Basak, I., & Saaty, T. (1993). Group decision making using the analytic hierarchy process. *Mathematical and Computer Modelling*, *17*(4–5), 101–109. https://doi.org/10.1016/0895-7177(93)90179-3

Beauchamp, C. J., Charest, M. H., & Gosselin, A. (2002). Examination of environmental quality of raw and composting de-inking paper sludge. *Chemosphere*, *46*(6), 887–895. https://doi.org/10.1016/S0045-6535(01)00134-5

Bennamoun, L., Arlabosse, P., & Léonard, A. (2013). Review on fundamental aspect of application of drying process to wastewater sludge. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *28*, 29–43. https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.07.043

Biagini, E., Fantozzi, C., & Tognotti, L. (2004). Characterization of devolatilization of secondary fuels in different conditions. *Combustion Science and Technology*, *176*(5–6), 685–703. https://doi.org/10.1080/00102200490428008

Carneado Moreno, A. (2009). *Estudio técnico-económico de una fábrica de cemento portland para la obtención de 1.000.000 TM al año*. Universitat Politècnica de Catalunya. https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/7088

Coburn, R., & Dolan, G. (1995). Beneficial use of paper mill sludge. *Biocycle*, *36*(9).

Colomer, F. J., Gallardo, A., Bovea, M. D., Carlos, M., & Herrera, L. (2009). *Characterization of Different Sludge From Municipal and Industrial Sewages Treatment Plants*. *August*.

Congreso de la República de Colombia. (1979). *Ley 9 de 1979 Nivel Nacional*. *1979*(Enero 24), 1–87. http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=1177

de Azevedo, A. R. G., Alexandre, J., Pessanha, L. S. P., Manhães, R. da S. T., de Brito, J., & Marvila, M. T. (2019). Characterizing the paper industry sludge for environmentally-safe disposal. *Waste Management*, *95*, 43–52. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.06.001

de Azevedo, A. R. G., Alexandre, J., Xavier, G. de C., & Pedroti, L. G. (2018). Recycling paper industry effluent sludge for use in mortars: A sustainability perspective. *Journal of Cleaner Production*, *192*, 335–346. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.011

Denzin, N. K. (2009). *A Theoretical Introduction to Sociological Methods*.

Departamento Nacional de Planeación, R. de C. (2016). *CONSEJO NACIONAL DE POLÍTICA ECONÓMICA Y SOCIAL CONPES*. 74. https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Económicos/3874.pdf

Empresa de acueducto, alcantarillado y aseo. B. D. . (2015). *Resolución 01 Enero 02 - 2015* (p. Anexo tecnico 6.4.). https://xperta-legis-co.ezproxy.unbosque.edu.co/visor/legcol/legcol_bf19652b376f7374c10979627a4c8bb0eb5nf9

ENEL Emgesa. (2019). *MEMORIA ANUAL 2019 - Emgesa S.A. ESP*. https://www.enel.pe/es/conoce-enel/acerca-de-enel-en-peru/equipo-open-power.html

Farooque, M., Zhang, A., Thürer, M., Qu, T., & Huisingh, D. (2019). Circular supply chain management: A definition and structured literature review. *Journal of Cleaner Production*, *228*(April), 882–900. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.303

Frías, M., Rodríguez, O., & Sánchez De Rojas, M. I. (2015). Paper sludge, an environmentally sound alternative source of MK-based cementitious materials. A review. *Construction and Building Materials*, *74*, 37–48. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.10.007

Frías, M., Vegas, I., García, R., & Vigíl, R. (2011). *Nuevos Materiales Ecoeficientes a Partir De Residuos De La Industria Papelera Como Adiciones Activas Para La Fabricación De Cementos Portland*. 13.

Garnica, C. (2013). Alternativas de gestión de lodos papeleros en la industria de papel tisú y kraft. *PhD Proposal*, *1*, 1–71. https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004

GENSA. (2020). *Informe de Sostenibilidad 2019*. 215.

Goel, G., & Kalamdhad, A. S. (2017). An investigation on use of paper mill sludge in brick manufacturing. *Construction and Building Materials*, *148*, 334–343. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.087

Grimm, A., Etula, J., Salh, R., Kalén, G., Segerström, M., Brücher, J., Söderberg, C., Soukup, D., Pfeifer, C., & Larsson, S. H. (2019). Slagging and fouling characteristics during co-combustion of Scots pine bark with low-temperature dried pulp and paper mill chemical sludge. *Fuel Processing Technology*, *193*(May), 282–294. https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2019.05.019

Hackett, G. A. R., Easton, C. A., & Duff, S. J. B. (1999). Composting of pulp and paper mill fly ash with wastewater treatment sludge. *Bioresource Technology*, *70*(3), 217–224. https://doi.org/10.1016/S0960-8524(99)00048-6

Hernández Sampieri, R., Feránadez Collado, C., & Baptizta Lucio, P. (2014). Metodología de la investigación. In *Metodología de la investigación*.

Huber, P., Ossard, S., Fabry, B., Bermond, C., Craperi, D., & Fourest, E. (2014). Conditions for cost-efficient reuse of biological sludge for paper and board manufacturing. *Journal of Cleaner Production*, *66*, 65–74. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.11.009

Instituto Nacional de Salud, R. de C. (2010). *Manual de Gestión Integral de Residuos*. *Version*

00(CODIGO: MNL-A05.002.0000-001), 105.

Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, *127*(April), 221–232. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005

L. Ochera, D. P. (2003). Lodos industriales a pequeña escala: mejoras en su gestión, haciendo uso de un proceso de secado térmico de los fangos. *Residuos: Revista Técnica Vol. 75*, 36–41. https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=781953

Latorre-Malaver, L. M., & Cote-Alarcon, M. (2020). Sustainable use of paper sludge from the Colombian paper industry. *AIMS Environmental Science*, *7*(3), 268–285. https://doi.org/10.3934/environsci.2020017

López, J. (2014). *Estudio de materiales compuestos obtenidos a partir de lodos celulosicos de la industria papelera, cemento y arcilla*. Pontificia Universidad Catolica del Peru.

Mandeep, Kumar Gupta, G., & Shukla, P. (2020). Insights into the resources generation from pulp and paper industry wastes: Challenges, perspectives and innovations. In *Bioresource Technology* (Vol. 297). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122496

Matott, D. (2017). *History of Paper & Paper Terms*. *October*.

Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. (2005). Decreto 0838 de 2005. *45862*, *0838*, 17. http://www.minambiente.gov.co/images/BosquesBiodiversidadyServiciosEcosistemicos/pdf/Normativa/Decretos/dec_0838_230305.pdf

Ministerio de vivienda ciudad y territorio. Republica de Colombia. (2018). *Decreto 2412 de 2018* (p. 17). http://es.presidencia.gov.co/normativa/normativa/DECRETO 2412 DEL 24 DE DICIEMBRE DE 2018.pdf

Ministerio del Medio Ambiente, R. de C. (1998). *Política para la gestión integral de Residuos* (p. 42). https://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/Politìcas_de_la_Dirección/Política_para_la_gestión_integral_de__1.pdf

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, E. (2013). *Lodos de depuración de aguas residuales*. Pais España. https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/prevencion-y-gestion-residuos/flujos/lodos-depuradora/

Molano Camargo, F. (2019). *El relleno sanitario Doña Juana en Bogotá: la producción política de un paisaje tóxico, 1988-2019.* (p. 23). Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas.

Monte, M. C., Fuente, E., Blanco, A., & Negro, C. (2009). Waste management from pulp and paper production in the European Union. *Waste Management*, *29*(1), 293–308. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.02.002

Morse, J. M. (1991). Approaches to qualitative-quantitative methodological triangulation. *Nursing Research*, *40*(2), 120–123. https://doi.org/10.1097/00006199-199103000-00014

Muñoz, B. (2016). *Investigación Aplicación de métodos de decisión multicriterio discretos al análisis de alternativas en estudios informativos de infraestructuras de transporte*

Application of Multicriteria Decision Methods in Evaluating Alternative Solutions for Transporta. 27–46.

Negret, L. C. M. (2018). Análisis económico de la alternativa de implantación de un patio de compostaje en la Universidad de Fortaleza para el tratamiento de residuos generados dentro del campus. *Universidad de La Salle Ciencia Unisalle*, 165–167. https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1742&context=ing_ambiental_sanitaria

Nuno De Coimbra, R. (2016). *Tratamiento térmico de lodos de la industria papelera. Utilización de subproductos para la adsorción de contaminantes emergentes del agua*. 135. https://buleria.unileon.es/bitstream/handle/10612/6912/Tesis de Ricardo Nuno de Coimbra.pdf?sequence=1

Ochoa de Alda, J. A. G. (2008). Feasibility of recycling pulp and paper mill sludge in the paper and board industries. *Resources, Conservation and Recycling*, *52*(7), 965–972. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2008.02.005

Pacheco, J. F., & Contreras, E. (2008). Manual para la evaluación multicriterio para programas y proyectos. In *Instituto Latinoamericano y del Caribe de Planificación Económica y Social (ILPES)*. https://doi.org/978-92-1-323231-6

Presidencia de la Republica de Colombia. (2005). *Decreto 4741 de 2005 Nivel Nacional*. Diario Oficial 46137 de Diciembre 30 de 2005. https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=18718

Quinchía, A., Valencia, M., & Giraldo, J. (2007). Uso de lodos provenientes de la industria papelera en la elaboración de paneles prefabricados para la construcciòn. *Uso de Lodos Provenientes de La Industria Papelera En La Elaboración de Paneles Prefabricados Para La Construcciòn*, *4*(8), 9–19. https://doi.org/10.24050/reia.v4i8.182

Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente Decreto 2811 de 1974., 1974 544 (1974) (testimony of Presidencia. Republica de colombia). https://doi.org/10.1111/j.0954-6820.1937.tb03385.x

Reyes Cantor, D. S., & Contreras Alfonso, C. S. (2015). Caracterización Físico-Mecánica Del Adoquín Con Lodos Papeleros Residuos De La Fabricación Del Papel. *Encuentro Internacional de Educación En Ingeniería*.

Rodríguez Sabiote, C., Pozo Llorente, T., & Gutiérrez Pérez, J. (2014). La triangulación analítica como recurso para la validación de estudios de encuesta recurrentes e investigaciones de réplica en Educación Superior. *RELIEVE - Revista Electrónica de Investigación y Evaluación Educativa*, *12*(2). https://doi.org/10.7203/relieve.12.2.4231

Smook, G. A. (1989). *Manual para tecnicos de Pulpa y Papel*. *1*, 396.

Sutcu, M., & Akkurt, S. (2009). *The use of recycled paper processing residues in making porous brick with reduced thermal conductivity*. *35*, 2625–2631. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2009.02.027

UPME. (2018). *INFORME MENSUAL DE VARIABLES DE GENERACIÓN Y DEL MERCADO ELÉCTRICO COLOMBIANO – AGOSTO DE 2018 SUBDIRECCIÓN DE ENERGÍA*

ELÉCTRICA – GRUPO DE GENERACIÓN INTRODUCCIÓN : El presente informe ilustra la situación actual , la evolución y el comportamiento parque. *69*, 1–14.

Vamvuka, D., Salpigidou, N., Kastanaki, E., & Sfakiotakis, S. (2009). Possibility of using paper sludge in co-firing applications. *Fuel*, *88*(4), 637–643. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2008.09.029

Yan, S., Sagoe-crentsil, K., & Shapiro, G. (2011). Reuse of de-inking sludge from wastepaper recycling in cement mortar products. *Journal of Environmental Management*, *92*(8), 2085–2090. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.03.028

Anexo 1. *Tabla de disposición de lodos Empacor S.A.*

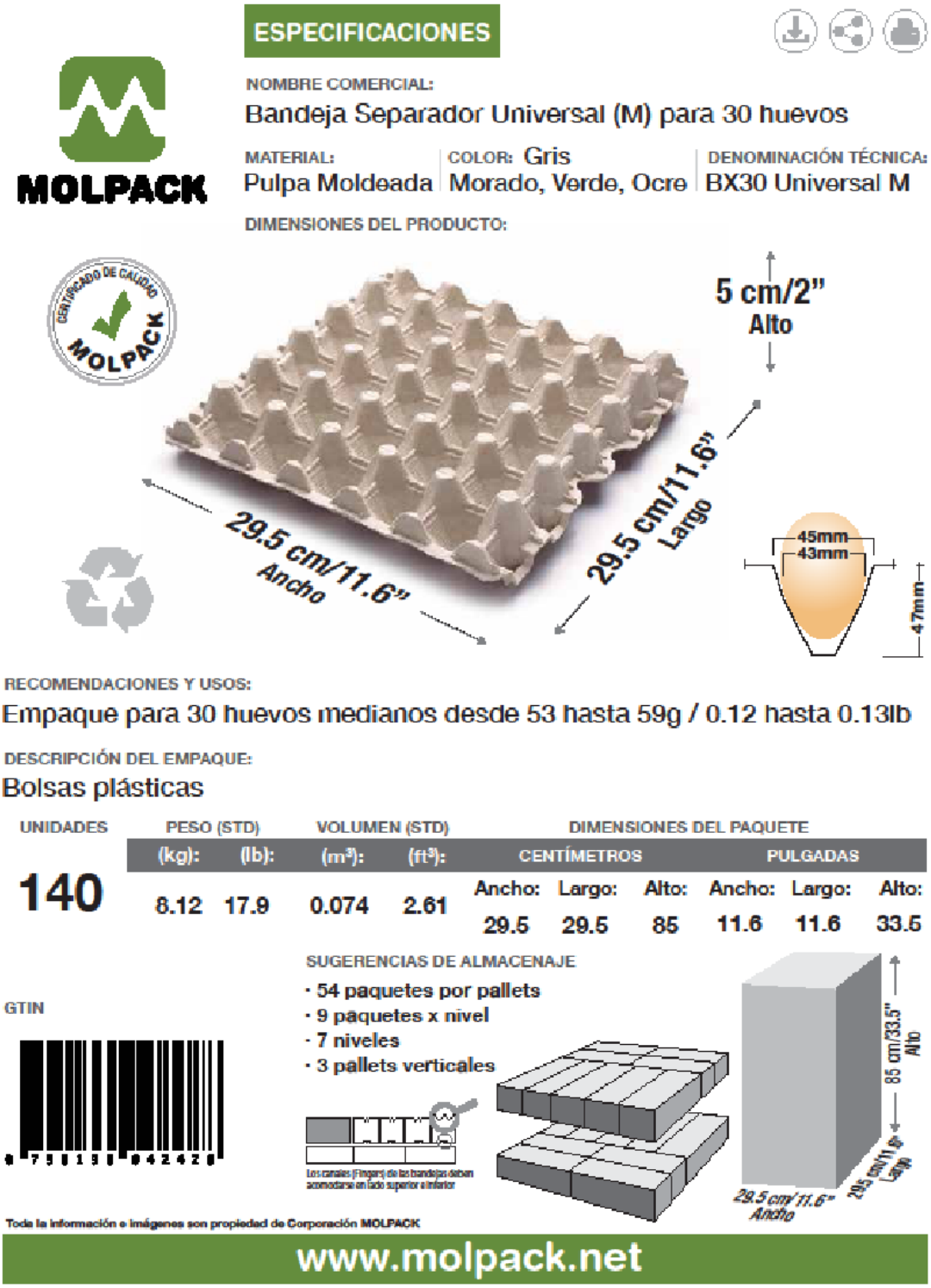
Tabla comparativa de datos lodos años 2017 a 2019

Año	2017			2018			2019		
Mes	kg producidos	Costo x Kg	Costo x mes	kg producidos	Costo x Kg	Costo x mes	kg producido	Costo x Kg	Costo x mes
Enero	498,609	23.14	$ 11,537,812	567,065	25.45	$ 14,434,073	590,670	28.00	$ 16,538,406
Febrero	514,670	23.14	$ 11,909,464	476,901	25.45	$ 12,139,038	567,810	28.00	$ 15,898,339
Marzo	560,980	23.14	$ 12,981,077	727,865	25.45	$ 18,527,076	647,114	28.00	$ 18,118,804
Abril	611,340	23.14	$ 14,146,408	567,089	25.45	$ 14,434,683	720,920	28.00	$ 20,185,327
Mayo	619,060	23.14	$ 14,325,048	617,541	25.45	$ 15,718,889	687,444	28.00	$ 19,248,020
Junio	687,514	23.14	$ 15,909,074	621,890	25.45	$ 15,829,588	610,940	28.00	$ 17,105,953
Julio	720,891	23.14	$ 16,681,418	645,789	25.45	$ 16,437,913	593,457	28.00	$ 16,616,440
Agosto	558,510	23.14	$ 12,923,921	587,413	25.45	$ 14,952,011	558,510	28.00	$ 15,637,945
Septiembre	624,570	23.14	$ 14,452,550	610,670	25.45	$ 15,543,994	624,570	28.00	$ 17,487,585
Octubre	745,670	23.14	$ 17,254,804	567,814	25.45	$ 14,453,138	745,670	28.00	$ 20,878,313
Noviembre	677,014	23.14	$ 15,666,104	610,760	25.45	$ 15,546,285	687,390	28.00	$ 19,246,508
Diciembre	645,110	23.14	$ 14,927,845	614,570	25.45	$ 15,643,265	631,209	28.00	$ 17,673,473
Total 2017	7,463,938		$ 172,715,525	7,217,385		$ 183,659,952	7,667,723		$ 214,635,113

AÑO	KILOGRAMOS GENERADOS	COSTO ANUAL
2017	7,463,938	COP 172,715,525
2018	7,217,385	COP 183,659,952
2019	7,667,723	COP 214,635,113

Fuente. *Empacor S.A.*

Anexo 2. *Especificaciones técnicas de cubeta para huevos*



MOLPACK

ESPECIFICACIONES

NOMBRE COMERCIAL:
Bandeja Separador Universal (M) para 30 huevos

MATERIAL: Pulpa Moldeada
COLOR: Gris Morado, Verde, Ocre
DENOMINACIÓN TÉCNICA: BX30 Universal M

DIMENSIONES DEL PRODUCTO:

RECOMENDACIONES Y USOS:
Empaque para 30 huevos medianos desde 53 hasta 59g / 0.12 hasta 0.13lb

DESCRIPCIÓN DEL EMPAQUE:
Bolsas plásticas

UNIDADES	PESO (STD)		VOLUMEN (STD)		DIMENSIONES DEL PAQUETE					
	(kg):	(lb):	(m^3):	(ft^3):	CENTÍMETROS			PULGADAS		
					Ancho:	Largo:	Alto:	Ancho:	Largo:	Alto:
140	8.12	17.9	0.074	2.61	29.5	29.5	85	11.6	11.6	33.5

GTIN

SUGERENCIAS DE ALMACENAJE
- 54 paquetes por pallets
- 9 paquetes x nivel
- 7 niveles
- 3 pallets verticales

Toda la información e imágenes son propiedad de Corporación MOLPACK

www.molpack.net

Fuente. *Molpack.net*

Anexo 3. *Caracterización realizada por Empacor S.A.*

	UNIVERSIDAD DE LOS ANDES DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL Y AMBIENTAL LABORATORIO AMBIENTAL	CODIGO: MT-INF-007 FECHA: 2014-07-22 VERSION: 3
	INFORME DE RESULTADOS	

INFORME DE RESULTADOS MUESTRA 835-18

FECHA: 2018-11-01

CLIENTE: Julian Patiño

DIRECCIÓN: Cra. 1E N°. 19A 40

MUESTRA No	835-18
MATRIZ:	LODO
CLASE DE MUESTRA:	PUNTUAL
IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA:	Lodo Residual
SITIO DE TOMA:	No Aplica
TOMADO POR:	Julian Patiño
FECHA DE TOMA	2018-10-24
HORA DE TOMA	10:00
FECHA DE RECEPCIÓN	2018-10-24

PARÁMETRO	RESULTADO	UNIDADES	FECHA EJECUCIÓN ANÁLISIS		MÉTODO
			Inicio	Final	
Nitrógeno	0,60	%	2018-10-26	2018-10-26	ASTM D5373-16
Carbono	34,9	%	2018-10-26	2018-10-26	ASTM D5373-16
Azufre	0,66	%	2018-10-26	2018-10-26	ASTM D5373-16
Hidrogeno	4,93	%	2018-10-26	2018-10-26	ASTM D5373-16

OBSERVACIONES: Muestra puesta en el laboratorio.

<XXX: Valor por debajo del límite de detección del método.

"XXX": Valor entre el límite de detección y el límite de cuantificación.

Los resultados son válidos única y exclusivamente para las muestras analizadas .
Este reporte no se debe reproducir parcialmente sin excepción, sin aprobación por escrito del Laboratorio

OLGA LUCIA GÓMEZ
LÍDER TÉCNICA FÍSICOQUÍMICA

FIN DEL INFORME

Anexo 4. *Análisis de peligrosidad de los lodos*

Parámetros	UNIDAD	Decreto 4741 de 2005-RSLN 062 de 2007	Resultados Jun-15	Nov-16	Nov-17 Lodo	Compostaje	ago-18 lodo	Compostaje	Cumple con la norma
Toxicidad ARSENICO (TCLP) (SUB)	mg/L As	5	<0.0100	<0.0025	<0.0025	<0.0025	<0.0025	<0.0025	cumple no tóxico
Toxicidad BARIO (TCLP)	mg/L Ba	10	>1	14.3	>1.00	>1.00	>1.00	>1.00	cumple no tóxico
Toxicidad CADMIO (TCLP)	mg/L Cd	1	>0.01	>0.01	>0.050	>0.050	>0.050	>0.050	cumple no tóxico
Toxicidad CROMO (TCLP)	mg/L Cr	5	>0.20	>0.20	>0.20	>0.20	>0.20	>0.20	cumple no tóxico
Toxicidad MERCURIO (TCLP)	mg/L Hg	0.2	>0.002	>0.001	>0.001	>0.001	>0.001	>0.001	cumple no tóxico
Toxicidad PLATA (TCLP)	mg/L Ag	5	>0.006	>0.06	>0.01	>0.01	>0.1	>0.1	cumple no tóxico
Toxicidad PLOMO (TCLP)	mg/L Pb	5	>0.10	>0.10	>0.10	>0.10	>0.10	>0.10	cumple no tóxico
Toxicidad SELENIO (TCLP)	mg/L Se	1	>0.0005	>0.0005	>0.0005	>0.0005	>0.0025	>0.0025	cumple no tóxico
Corrosividad	Unidades de PH	<2 ; >12.5	8.36	4.04	8.36	8.98	7.56	8.38	cumple no corrosivo
Reactividad de sulfuro	mg/kg			>19	>10	>10	>4	>4	cumple no reactivo
Reactividad de cianuros	mg/kg		0.02	>0.02	>0.02	>0.02	>0.02	>0.02	cumple no reactivo
Inflamabilidad	mm/s	>0.83	No inflamable	no inflammable	No inflamable	No inflamable	No inflamable	No inflamable	Cumple no inflamable

Fuente: (Latorre-Malaver & Cote-Alarcon, 2020)**.**

Anexo 5. *Cronograma de actividades.*

Nombre de la tarea	P3			P4		
	jul	ago	sep	oct	nov	dic
FASE EXPLORATORIA						
Obtener históricos de los últimos 3 años en la empresa Empacor S.A. sobre las cantidades de lodos resultantes, y el costo de disposición de los mismos.						
Recolectar datos de caracterizaciones realizadas en Empacor S.A. a los lodos resultantes del proceso de desfibrado del papel.						
Recopilar información en libros, artículos o publicaciones especializadas sobre la reutilización y disposición de lodos provenientes de industrias papeleras.						
FASE DE ANÁLISIS						
Análisis de la situación actual de disposición y los impactos generados por esta actividad.						
Contrastar los resultados de la caracterización de los lodos con los proyectos desarrollados a nivel global para determinar un posible método de reutilización en la organización u otras industrias en Bogotá y sus alrededores.						
FASE DE DISEÑO						
Establecer una propuesta de reutilización de lodos que permita la incorporación de estos residuos en otras industrias.						
Determinar los beneficios económicos, ambientales y sociales que genera el aprovechamiento de estos lodos.						