



**UNIVERSIDAD DE TALCA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN**

**ESTUDIO SOBRE LA DISMINUCIÓN DEL AGUA PRESENTE EN LOS LODOS  
NEGROS PARA SU UTILIZACION COMO BIOMASA.**

**DANITZA BERNAL SEPÚLVEDA**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO  
PROFESIONAL DE INGENIERO EN  
CONSTRUCCIÓN**

**PROFESOR GUÍA: CÉSAR RETAMAL BRAVO**

**CURICÓ – CHILE**

**2022**

## CONSTANCIA

La Dirección del Sistema de Bibliotecas a través de su encargado Biblioteca Campus Curicó certifica que el autor del siguiente trabajo de titulación ha firmado su autorización para la reproducción en forma total o parcial e ilimitada del mismo.



Two circular stamps and signatures are present. The left stamp is blue and reads "UNIVERSIDAD DE TALCA" at the top, "DIRECCIÓN" in the center, and "SISTEMA DE BIBLIOTECAS" at the bottom. A blue ink signature is written over the stamp. The right stamp is grey and reads "UNIVERSIDAD DE TALCA" at the top, "SISTEMA DE BIBLIOTECAS" in the center, and "CAMPUS CURICO" at the bottom. A blue ink signature is written over the stamp.

Curicó, 2023

## **DEDICATORIA**

Dedicada con especial cariño a Brayan Ahumada Espinoza, pues sin su apoyo y perseverancia, jamás hubiera llegado donde estoy.

La muerte deja un dolor  
que nadie puede curar,  
el amor deja un recuerdo  
que nadie puede borrar.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecer a cada una de las personas que fueron participes en este camino, que de una u otra manera aportaron en todos los años de universidad, familia, amigos y profesores.

En especial agradecer a quienes creyeron en que si podía lograr esta meta de salir de la universidad. A quienes me ayudaron en este último trayecto a confeccionar los quipos necesarios para realizar el trabajo encomendado. En especial a Freddy Valenzuela y Daniel Bustos, mis tíos, quienes fueron parte fundamental para realizar la parte práctica de dicha memoria, pues siempre estuvieron y están dispuestos a cooperar en lo que se necesite, tanto en parte práctica como moralmente

Al profesor Cesar Retamal, por ser mi profesor guía y gestor de esta idea a investigar.

Al profesor Cristian Vejares por prestarme apoyo tanto en el laboratorio de suelos, como también apoyo moral en todo lo necesario para realizar esta memoria.

También Al profesor Diógenes Hernández por facilitarme los instrumentos necesarios para realizar el trabajo, y a sus ayudantes del laboratorio por estar siempre dispuestos a cooperar.

## INDICE

Contenido

<b>CAPITULO I: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....</b>	<b>11</b>
1.1 Introducción .....	11
1.2 Objetivos .....	12
1.2.1 Objetivo general .....	12
1.2.2 Objetivos específicos .....	12
1.3 Justificación .....	12
<b>CAPITULO II: MARCO TEORICO.....</b>	<b>13</b>
2.1 Antecedentes históricos.....	13
2.2 Aguas servidas .....	13
2.2.1 Contaminantes principales de las aguas servidas .....	14
2.3 Plantas de tratamiento .....	14
2.3.1 Fases de depuración del agua .....	15
2.3.1.1 Pretratamiento .....	15
2.3.1.2 Tratamiento primario .....	15
2.3.1.3 Tratamiento secundario .....	15
2.3.2 Plantas de tratamiento en la región del maule.....	16
2.4 Lodos negros .....	17
2.4.1 Tipos de lodos .....	17
2.4.2 Métodos para extraer agua del lodo .....	17
2.4.2.1 Centrifugas o decanter.....	17
2.4.2.2 Filtro de bandas .....	18
2.4.2.2.1 Etapas del proceso de filtrado .....	18
2.4.2.3 Sistema natural de secado .....	19
2.4.3 Tratamiento del lodo .....	19
2.4.3.1 Método de lodos activados.....	19
2.4.3.1.1 Componentes sistema de lodos activados .....	20
2.4.3.2 Método de laguna aireada .....	21
2.4.3.2.1 Componentes lagunas aireadas.....	21
2.5 Normativa de plantas de tratamiento en Chile .....	22
2.5.1 Clasificación de lodos según Decreto Supremo N°4 .....	23

2.6	Biomasa.....	23
2.6.1	Antecedentes históricos de la biomasa.....	24
2.6.2	Tipos de biomasa.....	24
2.6.2.1	Biomasa natural.....	24
2.6.2.2	Biomasa residual seca .....	24
2.6.2.3	Biomasa residual húmeda .....	24
2.6.2.4	Biomasa producida.....	25
2.6.3	Conversión de biomasa en energía.....	25
2.6.3.1	Método Termoquímico.....	25
2.6.3.2	Métodos bioquímicos .....	25
2.6.3.3	Métodos químicos .....	26
2.6.3.4	Métodos físicos .....	26
2.6.4	Usos de biomasa.....	26
2.6.5	Ventajas y desventajas de la biomasa como energía térmica.....	27
2.6.6	Normativa relacionada con los biocombustibles sólidos en Chile .....	27
2.7	Pellet y briquetas .....	28
2.7.1	Pellet.....	28
2.7.2	Briquetas .....	28
2.7.2.1	Características físicas y químicas.....	29
2.8	Aserrín.....	30
2.9	Poder calorífico .....	31
2.9.2	Ejemplos poder calorífico de combustibles y biomasa.....	32
2.9.3	Bomba calorimétrica .....	33
2.10	Hipótesis y variables .....	34
<b>CAPITULO III: MARCO METODOLÓGICO.....</b>		<b>35</b>
3.1	Diseño de investigación .....	35
3.2	Selección de la muestra.....	35
3.3	Operacionalización de las variables .....	36
3.4:	Trabajo desarrollado .....	37
3.4.1	Materiales y equipos .....	37
3.4.1.1	Lodo negro .....	37
3.4.1.2	Aserrín.....	38
3.4.1.3	Lubricante .....	38

3.4.1.4 Horno de secado industrial.....	39
3.4.1.5 Prensa y moldes.....	39
3.4.1.6 Molinillo.....	40
3.4.1.7 Mufla de quemado.....	40
3.4.1.8 Bomba calorimétrica.....	41
3.4.1.9 Prensa hidráulica para ensayos mecánicos.....	41
3.4.1.10 Tamices.....	42
3.4.2 Desarrollo de actividades.....	42
3.4.2.1 Retiro de lodo negro desde PTAS.....	42
3.4.2.2 Análisis bacteriológico a lodo negro retirado de planta.....	43
3.4.2.3 Secado de lodo negro.....	43
3.4.2.4 Análisis bacteriológico a lodo negro seco.....	44
3.4.2.5 Molienda de lodo.....	44
3.4.2.6 Tamizado.....	45
3.4.2.7 Densidad lodo y aserrín.....	45
3.4.2.8 Incorporación de agua a lodo y aserrín.....	46
3.4.2.9 Fabricación de briquetas de lodo negro.....	47
3.4.2.10 Proceso de fabricación de briquetas de lodo negro con aserrín.....	47
3.4.2.11 Ensayo de Poder calorífico a lodo y aserrín.....	49
3.4.2.12 Ensayo poder calorífico a briquetas.....	49
3.4.2.13 Porcentaje de cenizas.....	50
3.4.2.14 Ensayos de resistencia mecánica.....	50
3.4.2.14.1 Ensayo de resistencia a la compresión.....	50
3.4.2.14.1 Ensayo de resistencia a la flexo-tracción.....	51
3.4.2.15 Ensayo tiempo de quemado de briquetas.....	51
3.5: Resultados primarios, iniciales.....	52
3.5.1 Humedad lodo extraído de planta:.....	52
3.5.2 Densidad lodo negro.....	54
3.5.3 Densidad aserrín:.....	54
3.5.4 Tamizado lodo:.....	55
3.5.5 Ensayo de poder calorífico y producción de cenizas de lodo negro y aserrín.....	55
<b>CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y ANÁLISIS.....</b>	<b>58</b>
4.1 Cantidad de compresiones de briquetas.....	58

4.2 Poder calorífico y porcentaje de cenizas diferentes composiciones de briquetas .....	59
4.2.1 Briquetas lodo negro .....	59
4.2.2 Briquetas lodo negro con 5% de aserrín.....	60
4.2.3 Briquetas lodo negro con 10% de aserrín.....	61
4.2.4 Resumen resultado final y análisis.....	62
4.3 Resistencia mecánica de briquetas .....	63
4.4 Tiempo de quemado de la briqueta .....	64
<b>CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>67</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>69</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>71</b>

## **INDICE DE TABLAS**

Tabla 1. Procesos plantas de tratamiento de aguas servidas .....	14
Tabla 2. Ventajas y desventajas biomasa como energía térmica .....	27
Tabla 3. Unidades más utilizadas en poder calorífico.....	31
Tabla 4. Poder Calorífico Combustibles en KJ/Kg.....	32
Tabla 5. Poder Calórico Biomosas en KJ/Kg.....	32
Tabla 6. Operacionalización de las variables.....	36
Tabla 7. análisis bacteriológico lodo con humedad .....	43
Tabla 8. Análisis bacteriológico lodo seco .....	44
Tabla 9. Volumen lodo y aserrín en briquetas .....	47
Tabla 10. Masa lodo y aserrín en briquetas.....	48
Tabla 11. Densidades muestras lodo negro.....	54
Tabla 12. Muestras densidades aserrín.....	54
Tabla 13. Resultados de tamizado de lodo.....	55
Tabla 14. Porcentaje de cenizas lodo negro .....	56
Tabla 15. Porcentaje de cenizas aserrín .....	57
Tabla 16. Compresiones briquetas .....	58
Tabla 17. Porcentaje de cenizas Briquetas de Lodos Negros.....	59
Tabla 18. Porcentaje de cenizas Briquetas de Lodos Negros con 5% de aserrín.....	60
Tabla 19. Porcentaje de cenizas Briquetas de Lodos Negros con 10% de aserrín.....	61



Tabla 20. Resumen resultados poder calorífico y porcentaje de cenizas .....	62
Tabla 21. Resistencia a la compresión de briquetas.....	63
Tabla 22. Resistencia a la flexo-tracción de briquetas .....	63
Tabla 23. Tiempo de combustión de briquetas en minutos.....	64
Tabla 24. Tiempo de evaporación de agua.....	64

## **INDICE DE IMÁGENES**

Imagen 1. Planta de tratamiento Iloca.....	16
Imagen 2. Decanter .....	17
Imagen 3. Filtro de bandas .....	18
Imagen 4. Eras de secado.....	19
Imagen 5. Componentes sistema de lodos activados .....	20
Imagen 6. Componentes laguna aireada.....	21
Imagen 7. Tabla 1 Extraída de Decreto Supremo N°90 año 2000 .....	22
Imagen 8. Biomasa.....	23
Imagen 9. Tabla normas relacionadas con biocombustibles .....	27
Imagen 10. Parámetros pellet de calidad.....	28
Imagen 11. Parámetros briqueta de calidad .....	30
Imagen 12. Lodo negro .....	37
Imagen 13. Aserrín.....	38
Imagen 14. Lubricante .....	38
Imagen 15. Horno industrial .....	39
Imagen 16. Prensa y moldes .....	39
Imagen 17. Molinillo.....	40
Imagen 18. Mufla.....	40
Imagen 19. Bomba calorimétrica .....	41
Imagen 20. Prensa ensayos mecánicos.....	41
Imagen 21. Tamices .....	42
Imagen 22. Retiro lodo desde planta.....	42
Imagen 23. Secado lodo.....	43
Imagen 24. Molienda de lodo.....	44
Imagen 25. Tamizado.....	45

Imagen 26. fabricación de briquetas de lodo negro .....	47
Imagen 27. Fabricación de briquetas con aserrín incorporado.....	48
Imagen 28. Ensayo poder calorífico.....	49
Imagen 29. Ensayo poder calorífico a briquetas .....	49
Imagen 30. Ensayo porcentaje de cenizas .....	50
Imagen 31. Ensayo resistencia a la compresión.....	50
Imagen 32. Ensayo Flexo-tracción.....	51
Imagen 33. tiempo de quemado de briquetas.....	52
Imagen 34. Poder calorífico lodo negro.....	55
Imagen 35. Poder calorífico aserrín .....	57
<i>Imagen 36. Inspección visual de briquetas .....</i>	<i>58</i>
Imagen 37. Briqueta 10% de aserrín v/s 50% de aserrín .....	62
Imagen 38. Briquetas con iniciador de fuego.....	65
Imagen 39. Briqueta pasados 40 minutos .....	65

## **INDICE DE GRÁFICOS**

Gráfico 1. Material retenido en tamices .....	71
Gráfico 2. Cantidad de compresiones según forma probetas .....	71
Gráfico 3. Poder calorífico biomásas convencionales y briquetas de lodo negro .....	72
Gráfico 4. Poder calorífico biomásas convencionales y briquetas con 5% aserrín .....	72
Gráfico 5. Poder calorífico biomásas convencionales y briquetas con 10% aserrín .....	73
Gráfico 6. Poder calorífico briquetas, según % de aserrín agregado .....	73

## RESUMEN

La presente memoria se centra en la investigación de un uso alternativo para la utilización de lodos negros provenientes de plantas de aguas servidas, con el cual se pretende producir biomasa. Para esto, en primer lugar, se realiza una investigación relacionada al objetivo a alcanzar, de modo de analizar si es posible realizar cada uno de los procedimientos que se pretenden para llegar a dicho objetivo final que es la quema del lodo.

El primer paso por realizar es un análisis químico del lodo a utilizar, de modo de averiguar sus cualidades, y si este es apto para fabricar briquetas, conociendo el potencial que puede llegar a tener.

El trabajo se centra en la ejecución de pruebas de laboratorio, donde se realizaron briquetas solo de lodos negros, así como también briquetas con diferentes dosificaciones de aserrín. Dichas briquetas fueron elaboradas con una prensa artesanal, confeccionada para la ocasión.

Se utilizaron 3 dosificaciones diferentes, en las que se varió la incorporación de aserrín, de la siguiente manera, un 0%, 5% y 10%. En estas probetas se evaluó su comportamiento físico y químico, realizando pruebas de poder calorífico, porcentaje de cenizas, tiempo de quemado y resistencia a la compresión y flexo-tracción.

De los resultados obtenidos en los ensayos mencionados en el párrafo anterior, se logra concluir que es factible realizar briquetas de lodos negros, y estas tienen propiedades bastantes buenas para su eventual uso generando energía calórica. Además, cada tipo de briqueta generado tiene distintas cualidades sobre las demás, ya que las briquetas de 5% de aserrín, se queman de manera mas lenta, pero a la vez demoran mas en hervir 250 ml de agua. Y las briquetas de lodo negro solamente, generan más llama que las demás.

Vale decir, que las briquetas fabricadas, en el último proceso, el proceso de quemado, no emanan un olor desagradable al entorno, aunque si generan una gran cantidad de humo, lo cual es molesto para el ambiente.

Además, es necesario considerar que se deben buscar alternativas para mejorar, mecanizar y automatizar la fabricación de briquetas, pues el sistema utilizado en la elaboración de esta memoria funciona de manera correcta, pero solamente a pequeña escala y no da abasto con la cantidad de lodo generado al día en una planta de tratamiento de aguas servidas.

Finalmente se recomienda buscar alternativas para controlar el hedor emanado por los lodos al momento de ser secados, para hacer el trabajo más agradable con el entorno.

## CAPITULO I: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

### 1.1 Introducción

Las aguas servidas son aguas residuales generadas en domicilios e industrias, las cuales no pueden ser utilizadas o vertidas a ríos, lagos o mares sin un tratamiento previo.

A nivel mundial el 50% de las aguas servidas son tratadas antes de llegar a flujos de agua naturales, en Chile existen actualmente 290 plantas de tratamiento, con esto el 99% de las ciudades cuenta con tratamiento para sus aguas, según la Superintendencia de Servicio Sanitarios, pues en la década del 90 el mayor problema de contaminación que se generaba en Chile era en las aguas, tanto de ríos como de mar, producto de que las aguas servidas llegaban directamente a ellos sin pasar por un sistema de tratamiento, por este motivo se iniciaron políticas públicas, como la instauración del Decreto Supremo N°90 año 2000 el cual reglamenta el manejo de fluentes y el Decreto Supremo N°4 año 2009 el cual reglamenta el manejo de lodos, con ellos además se invirtieron 2500 millones de dólares para generar plantas de tratamiento, sin embargo, estas generan un nuevo problema de contaminación el cual es la producción (subproducto generado) de lodos negros.

Estos lodos generan un problema, pues producen malos olores los cuales afectan a las comunidades aledañas a las plantas de tratamiento, además sus volúmenes son muy elevados al contener un gran porcentaje de agua (entre 80% y 90%). Dichos lodos son depositados en lechos de secado autorizados, sin embargo, no se les da otra utilización más que para rellenos sanitarios. Entre las empresas de tratamiento de aguas de Chile se encuentra Aguas Nuevo Sur, la cual tiene diferentes plantas a lo largo de la Séptima Región del Maule, esta cuenta con una planta en la Comuna de San Clemente, de la cual el lodo es retirado por la empresa Ecomaule y depositado en un lugar de acopio en la comuna de Rio Claro, esto genera un gran coste, es por esto que es de suma relevancia encontrar una solución para la utilización de este lodo como materia prima, por esta razón el presente estudio tiene una motivación tanto académica, así como también medioambiental y social y contempla la utilización de estos, como biomasa.

La biomasa es un producto que sirve para generar energía, esta abarca todo tipo de materia orgánica que se pueda utilizar como combustible, puede ser de fuentes agrícolas, forestales o aguas residuales, esta ayuda a disminuir la contaminación eliminando residuos y evitando la acumulación de estos, como es el caso de los lodos negros, los cuales contaminan el subsuelo y el ambiente, por esto se estos son un buen elemento para incinerar, pues posee entre un 45% a un 60% de materia orgánica.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo general**

Estudiar y analizar la factibilidad del uso de lodos negros para su utilización en la producción de biomasa a través de la disminución del porcentaje de agua presente en él.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Identificar diferentes métodos de disminución de agua en lodos, para elegir una opción específica.
- Definir el porcentaje de humedad óptimo para quemar el lodo, utilizando métodos de investigación y de laboratorio.
- Realizar análisis fisicoquímico del lodo para definir sus propiedades, por medio de pruebas de laboratorio.
- Realizar pruebas de poder calorífico del lodo seco, con el fin de conocer su rendimiento.
- Proponer diferentes formas de utilización y quema de bio masa, de modo de seleccionar el mejor método.
- Generar pallet o eco briquetas para ser quemados.

## **1.3 Justificación**

El proyecto comprende la producción de biomasa ocupando como materia prima lodos residuales provenientes de plantas de tratamiento de aguas servidas, con el fin de reducir los volúmenes de este desecho, el cual se ocupa actualmente en su mayoría como relleno sanitario, lo cual genera un gran costo en su transporte, es por esto que para cumplir dicho propósito, la investigación se centra en el cumplimiento de cada uno de los objetivos, para esto se define cual es el mejor método para bajar la humedad del lodo, realizando además un análisis de sus propiedades, de modo de estar en conocimiento si este al ser secado y posteriormente quemado puede generar algún daño a la salud de las personas, además se realizan pruebas, para conocer las propiedades caloríficas de este, de modo de saber cuál es el rendimiento que este tendría al ser ocupado como energía (combustible) en una maquina o en calefacción de un recinto, para esto se generan propuestas para ser quemado, ya sea a través de la generación de pallets o briquetas, analizando cual es el modo más apropiado según la necesidad de su utilización.

## CAPITULO II: MARCO TEORICO

### 2.1 Antecedentes históricos

El tratamiento de aguas se inicia en el siglo XIX, pues con la revolución industrial, emigraban muchas personas del campo a la ciudad, con esto los sistemas de alcantarillados existentes hasta entonces colapsaron, fue entonces que se decide comenzar a diluir esta agua en centrales, para enviarlas a ríos cuando estos subían su caudal, sin embargo, estos no daban abasto, también colapsaron.

Por esto en el siglo XX en Nueva York se comenzó a bombear esta agua al mar, lo cual contaminó las playas, por tanto, tampoco era una solución. Por esto en el año 1988 se prohibió lanzar aguas servidas al mar en el “Congreso de Estados Unidos”. Sin embargo, el 90% de los países en vía de desarrollo, aun lanza sus aguas sin depurar directamente a las corrientes de aguas superficiales, lo cual provoca cientos de muertes al día.

En Chile en 1931 comienza el control de los servicios sanitarios con la creación de la Dirección General de Agua Potable y Alcantarillado, sin embargo, en el año 1990 nace como tal la SISS (Superintendencia de Servicios Sanitarios), la cual se encarga de supervisar las diferentes empresas de servicios sanitarios, con su creación se logró controlar los contagios de colera en los años 90, mediante una mayor fiscalización en cuanto al agua potable y a las plantas de tratamiento, cerciorándose que estas cumplieran con los estándares de calidad del agua antes de ser devuelta a flujos naturales. Desde entonces cada empresa es fiscalizada periódicamente, debiendo cumplir el Decreto Supremo N°90, el cual controla la descarga en fluentes y el Decreto Supremo N°04 el que se encarga del control de lodos negros.

### 2.2 Aguas servidas

Las aguas servidas, también llamadas aguas residuales, corresponden a aquellas que se han visto contaminadas por el ser humano y no pueden ser devueltas de forma directa a un curso natural, como mares, ríos o lagos. Estas son llevadas a través de sistemas de alcantarillados a plantas donde son tratadas y descontaminadas antes de ser devueltas a dichos cursos. Estas se conforman de un 99% de agua y en 1% de sólidos, estos sólidos tienen dos grandes grupos, pues pueden ser orgánicos e inorgánicos.

- **Sólidos inorgánicos:** nitrógeno, fosforo, carbonatos, cloruros, sustancias tóxicas (cianuro, mercurio).
- **Sólidos Orgánicos:** nitrogenados (proteínas, aminas), no nitrogenados (celulosa, grasas).

### 2.2.1 Contaminantes principales de las aguas servidas

Las aguas servidas poseen una gran cantidad de contaminantes, dentro de los principales se encuentran los siguientes:

- **Sólidos suspendidos:** Son aquellos sólidos que permanecen en suspensión en el agua, como coloides (sólido con partículas pequeñas), estos se pueden eliminar por sedimentación.
- **Patógenos:** Aquellos que son de origen fecal, también llamado germen (bacterias, virus), puede provocar enfermedades.
- **Nutrientes:** Tales como fósforo, nitrógeno y carbono.
- **Materia orgánica:** Es aquella que puede ser biodegradada o descompuesta por otros seres vivos.

### 2.3 Plantas de tratamiento

Las plantas de tratamiento de aguas servidas corresponden a un conjunto de sistemas que se encargan de depurar el agua a través de diferentes procesos mecanizados, para que esta pueda volver a un curso natural. Por lo general las plantas necesitan solo de un operador ya que todos los procesos son realizados por equipos.

Los principales procesos que se producen en una planta de tratamiento son los siguientes:

Proceso	Característica
<b>Físico</b>	Consisten en la eliminación de sólidos presentes en el agua, los cuales se encuentran en suspensión o flotación, para esto se usan fenómenos físicos, como fuerza centrífuga.
<b>Químico</b>	Consiste en la eliminación de contaminantes del agua, a través de la incorporación de elementos químicos en ella, como el intercambio iónico.
<b>Biológico</b>	Consiste en la eliminación de contaminantes, a través de microorganismos y bacterias, los cuales limpian el agua, alimentándose de materia biodegradable, como lodos activos, lagunas aireadas.

*Tabla 1. Procesos plantas de tratamiento de aguas servidas*

*Fuente: Propia*

### 2.3.1 Fases de depuración del agua

#### 2.3.1.1 Pretratamiento

En esta fase se procede a retirar todo tipo de basura de gran tamaño para que no dañe maquinarias o equipos de la planta de tratamiento, muchas veces la basura de gran tamaño debe ser retirada por el operador de la planta.

#### 2.3.1.2 Tratamiento primario

En este tratamiento se baja el nivel de contaminación del agua, se retiran sólidos y partículas en suspensión (sedimentarias o flotantes), mediante diferentes métodos físico- químicos, los cuales pueden ser:

- **Sedimentación:** Consiste en eliminar sólidos mediante la acción gravitatoria, en este los sólidos se van al fondo, logrando eliminar hasta un 40%. Se realiza en tanques de gran tamaño llamados decantadores.
- **Flotación:** Consiste en eliminar Grasas, aceites y espumas, ya que estos se encuentran en la capa superficial debido a la baja densidad, para ayudar en el proceso se inyectan burbujas de aire, con este método es posible eliminar un 75% de partículas en suspensión. Se realiza en tanques llamados flotadores de aire disuelto.
- **Neutralización:** Consiste en el ajuste de pH, entre 6-8.5, en aguas con valor de pH alto se agrega CO<sub>2</sub>, mientras que en aguas con pH bajo se agregan sustancias alcalinas (pH mayor a 7).

#### 2.3.1.3 Tratamiento secundario

En este tratamiento se eliminan la materia orgánica que pueda estar presente en el agua, a través de métodos biológicos, donde microorganismos y bacterias transforman materia orgánica en biomasa celular, energía, agua y gases. Este tratamiento cuenta con dos procesos, los cuales pueden ser:

- **Aeróbico:** Este proceso se realiza en presencia de oxígeno, mediante burbujeo en tanques de almacenamiento, en este se desprende CO<sub>2</sub> y agua de la materia orgánica, además de productos nitrogenados. Ejemplo de estos procesos son lodos activos, lagunas aireadas y lechos bacterianos.



- **Anaeróbico:** Este proceso se realiza en ausencia de oxígeno, la materia orgánica es transformada en CO<sub>2</sub>, metano y energía, mediante fermentación. Ejemplo de este es la digestión anaeróbica.

#### 2.3.1.4 Tratamiento terciario

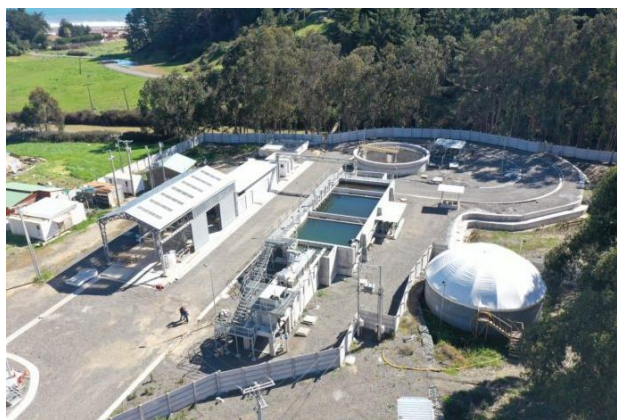
En este tratamiento se eliminan agentes patógenos y materia orgánica que continúe en el agua, es la etapa final antes que el agua sea devuelta a un curso natural, por lo cual debe quedar libre de bacterias de origen fecal, nitrógeno, fósforo o cualquier agente contaminante, para esto se utilizan métodos como, tratamiento con luz ultravioleta, o tratamiento con clorina, siendo este último el más utilizado.

#### 2.3.2 Plantas de tratamiento en la región del maule

Según la SISS (Superintendencia de Servicios Sanitarios), al año 2019, en la Región del Maule existían 30 plantas de tratamiento de aguas servidas, de las cuales 22 usan el método de lodos activados, 6 corresponden a laguna aireada, 1 a laguna de estabilización y 1 a biofísicos. Las cuales se rigen según el Decreto Supremo N°90 año 2000 -Tabla 1.

Según el último informe de la SISS solo las plantas de Longaví y Pelluhue no cumplen dicho decreto al año 2022.

Además, al año 2009, con la inauguración de la planta Constitución la Región del Maule alcanzaba una cobertura de 95,5% en sistema de tratamiento de aguas, y con la inauguración de la planta Iloca, al año 2022, se alcanza el 100% de cobertura de tratamiento de aguas en la zona urbana de la Región.



*Imagen 1. Planta de tratamiento Iloca*

*Fuente (new.diariolaprensa.cl)*

## 2.4 Lodos negros

Los lodos negros, también llamados biosólidos, son residuos generados en plantas de tratamientos de aguas servidas, luego de la depuración del agua, dichos lodos poseen aproximadamente un 95% de humedad.

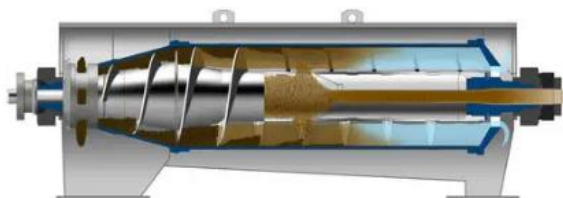
### 2.4.1 Tipos de lodos

- **Lodo crudo:** Corresponde al que no ha sido tratado o estabilizado, produce olor.
- **Lodo Primario:** Corresponde al que se produce en el tratamiento primario, su porcentaje de agua varía entre 93%-97%, tiene restos de papel y materia orgánica, se deposita al fondo del tanque de sedimentación.
- **Lodo activo:** Corresponde al lodo que es generado luego de pasar por un proceso biológico con microorganismos, contiene biomasa y minerales.
- **Lodo activo de retorno:** Corresponde al lodo que va nuevamente al tanque de aireación.
- **Lodo secundario (Exceso de lodo):** Corresponde al lodo que contiene biomasa y partículas no hidrolizables (partículas que no se descomponen con el agua).
- **Lodo terciario:** Corresponde al lodo que se produce por la adición de agentes floculantes (unen partículas en suspensión).
- **Lodo digerido:** Corresponde al que se produce en la digestión aeróbica, tiene olor a tierra.

### 2.4.2 Métodos para extraer agua del lodo

#### 2.4.2.1 Centrifugas o decanter

La máquina de decanter consiste en una pieza en espiral por donde pasa el lodo, para sacar agua de él, a través de giros, a alta velocidad, el agua pasa por el centro, mientras que el lodo se sedimenta en las paredes. El agua finalmente sale de la maquina a través de un tubo de vertido.



*Imagen 2. Decanter*

*Fuente(www.directindustry.es)*

### 2.4.2.2 Filtro de bandas

En este método el lodo pasa por dos bandas de tela filtrante, este es retenido a través de compresión y es depositado al final de la máquina, mientras que el agua cae a través de las bandas.



*Imagen 3. Filtro de bandas*

*Fuente (www.dlc.cl)*

#### 2.4.2.2.1 Etapas del proceso de filtrado

- **Floculación:** En esta etapa se separa el lodo del agua con adición de polielectrolitos orgánicos.
- **Predeshidratación:** En esta etapa se drena el lodo a través de la banda, por gravedad.
- **Filtración:** En esta etapa la mezcla debe pasar a través de la banda por un sector de tambores perforados.
- **Compactación y escurrido:** Esta etapa se produce en el sector de mayor presión, y la mezcla se compacta en su máximo valor.
- **Descarga:** Los sólidos ya deshidratados, se depositan al final del sistema.
- **Limpieza:** Las bandas deben recibir limpieza continuamente a fin de que su funcionamiento sea el óptimo.

### 2.4.2.3 Sistema natural de secado

- Eras de secado

En este sistema el lodo es depositado sobre capas de arena y grava de 10 cm por lo general, el agua se extraer por evaporación natural y bajo las capas hay sistemas de tuberías que recogen el agua sobrante, para llevarla a tratar. Su principal inconveniente, es que se requiere de gran cantidad de espacio.



*Imagen 4. Eras de secado*

*Fuente (www.usual.es)*

### 2.4.3 Tratamiento del lodo

#### 2.4.3.1 Método de lodos activados

Este método consiste en microorganismos que se alimentan de elementos orgánicos biodegradables, mejorando la calidad del agua, estos convierten materia orgánica, en agua, dióxido de carbono u oxígeno.

Este se realiza a través de un proceso aeróbico, pues se inyecta aire mediante aireadores mecánicos, para mantener los sólidos en suspensión y en contacto con bacterias, de esta manera los microorganismos se agrupan, por tanto, crecen y se depositan en el fondo del estanque.

### 2.4.3.1.1 Componentes sistema de lodos activados

- **Reactor o tanque de aireación**

En este los microorganismos se encuentran aireados y en suspensión, estos microorganismos, requieren de nutrientes y oxígeno para desarrollarse, es por esto que se inyecta oxígeno con aireadores mecánicos, pues todos los nutrientes necesarios, se encuentran disponibles en las aguas servidas.

- **Fuente de aireación**

Este componente, permite mantener aireado el sistema, transmitiendo oxígeno a él, pues el oxígeno presente de forma natural es consumido a gran velocidad por los microorganismos.

Este sistema permite que los sólidos estén siempre en suspensión y que las aguas se mezclen con el lodo recirculado (lodo de retorno).

- **Tanque de sedimentación**

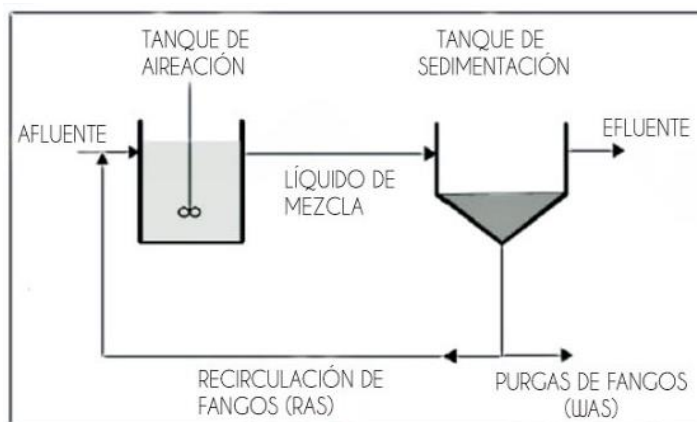
En este se separan los sólidos del agua, este proceso se realiza en un sedimentador secundario, posterior a esto, el lodo vuelve al tanque de aireación.

- **Sistema de tuberías y bombas**

A través de este recirculan los sólidos (sistema de retorno de lodos), desde el sedimentador secundario, hasta el tanque de aireación, este proceso se realiza normalmente con bombas.

- **Tubería de desecho**

A través de este se desecha el lodo que se encuentra en exceso en el sistema (purga de lodos).



*Imagen 5. Componentes sistema de lodos activados*

*Fuente (www.iagua.es)*

### 2.4.3.2 Método de laguna aireada

Las lagunas aireadas consisten en grandes piscinas en las cuales se inyecta oxígeno mediante medios mecánicos, lo cual permite que los microorganismos aeróbicos permanezcan en suspensión y mezclados con el agua, dichas piscinas pueden estar construidas en la tierra.

Muchas lagunas de estabilización son adaptadas a lagunas aireadas, ya que las lagunas de estabilización realizan este proceso de aireación por medio de fotosíntesis de algas o por acción del viento, lo cual hace que sea un proceso mucho más lento, que el medio mecanizado.

#### 2.4.3.2.1 Componentes lagunas aireadas

- **Laguna de aireación**

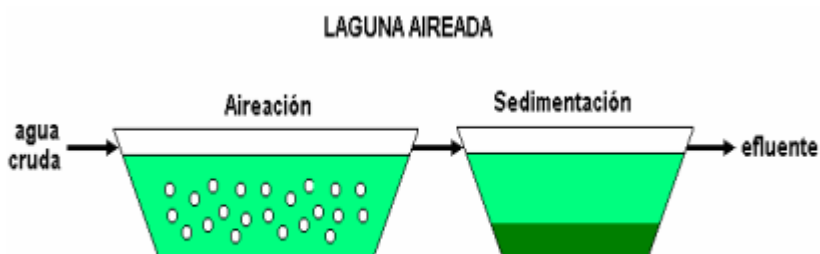
Corresponde a un pozo o piscina, construida en tierra, de gran tamaño, en el cual se inyecta oxígeno a las aguas servidas, para mantener a los microorganismos con una buena oxigenación.

- **Laguna de sedimentación**

Corresponde a un pozo o piscina, construida en tierra, en el que los sólidos decantan, no hay turbulencias.

- **Aireadores**

Corresponden a dispositivos o equipos que inyectan aire a lagunas lo cual que permite la mezcla de los componentes de las aguas servidas.



*Imagen 6. Componentes laguna aireada*

*Fuente (www. <http://repobib.ubiobio.cl/>)*

## 2.5 Normativa de plantas de tratamiento en Chile

Las plantas de tratamiento de aguas en Chile se rigen por el *Decreto Supremo N° 90 del año 2000* el cual “Establece norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales” <sup>[1]</sup>, se deben cumplir los parámetros que este establece en su “*tabla N°1 límites máximos permitidos para la descarga de residuos líquidos a cuerpos de agua fluviales*” <sup>[1]</sup>, la que se presenta a continuación.

TABLA N° 1

LIMITES MAXIMOS PERMITIDOS PARA LA DESCARGA DE RESIDUOS LIQUIDOS A CUERPOS DE AGUA FLUVIALES

Contaminantes	Unidad	Expresión	Limite Máximo Permitido
Aceites y Grasas	mg/L	A y G	20
Aluminio	mg/L	Al	5
Arsénico	mg/L	As	0,5
Boro	mg/L	B	0,75
Cadmio	mg/L	Cd	0,01
Cianuro	mg/L	CN-	0,20
Cloruros	mg/L	Cl-	400
Cobre Total	mg/L	Cu	1
Coliformes Fecales o Termotolerantes	NMP/100 ml	Coli/100 ml	1000
Indice de Fenol	mg/L	Fenoles	0,5
Cromo Hexavalente	mg/L	Cr6+	0,05
DBO5	mg O2/L	DBO5	35 *
Fósforo	mg/L	P	10
Fluoruro	mg/L	F-	1,5
Hidrocarburos Fijos	mg/L	HF	10
Hierro Disuelto	mg/L	Fe	5
Manganeso	mg/L	Mn	0,3
Mercurio	mg/L	Hg	0,001
Molibdeno	mg/L	Mo	1
Níquel	mg/L	Ni	0,2
Nitrógeno Total Kjeldahl	mg/L	NKT	50
Pentaclorofenol	mg/L	C6OHC15	0,009
PH	Unidad	pH	6,0 -8,5
Plomo	mg/L	Pb	0,05
Poder Espumógeno	mm	PE	7
Selenio	mg/L	Se	0,01
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	SS	80 *
Sulfatos	mg/L	SO42-	1000
Sulfuros	mg/L	S2-	1
Temperatura	C°	T°	35
Tetracloroeteno	mg/L	C2C14	0,04
Tolueno	mg/L	C6H5CH3	0,7
Triclorometano	mg/L	CHCl3	0,2
Xileno	mg/L	C6H4C2H6	0,5
Zinc	mg/L	Zn	3

Imagen 7. Tabla 1 Extraída de Decreto Supremo N°90 año 2000

Fuente (Decreto Supremo 90)

Además, se debe cumplir el decreto supremo N°4, el cual establece el “*reglamento para el manejo de lodos generados en plantas de tratamiento de aguas servidas*”<sup>[2]</sup>.

Los lodos normalmente son utilizados como rellenos sanitarios o mono rellenos, el decreto define dichos términos como:

- **“Mono-relleno para lodos:** *Instalación para la disposición final de lodos, de acuerdo con lo establecido en el presente reglamento*”. (DS N°4, 2009).
- **“Relleno Sanitario:** *Instalación para la disposición final de residuos sólido-domiciliarios y asimilables, diseñada, construida y operada para minimizar molestias y riesgos para la salud de la población y daño para el medio ambiente, en el cual los residuos son compactados en capas al mínimo volumen practicable*”. (DS N°4, 2009).

### 2.5.1 Clasificación de lodos según Decreto Supremo N°4

- **“Lodos Clase A:** *Corresponde a “Lodo sin restricciones sanitarias para aplicación al suelo”, estos son lodos poco contaminantes*”. (DS N°4, 2009).
- **“Lodos Clase B:** *Corresponde a “Lodo apto para aplicación al suelo, con restricciones sanitarias de aplicación según tipo y localización de los suelos o cultivos”*”. (DS N°4, 2009).

## 2.6 Biomasa

La biomasa es un tipo de materia orgánica con la cual se produce energía. Esta materia orgánica se produce a través de un proceso biológico, ya sea espontaneo o provocado. Esta puede ser de origen agrícola, forestal o aguas residuales.

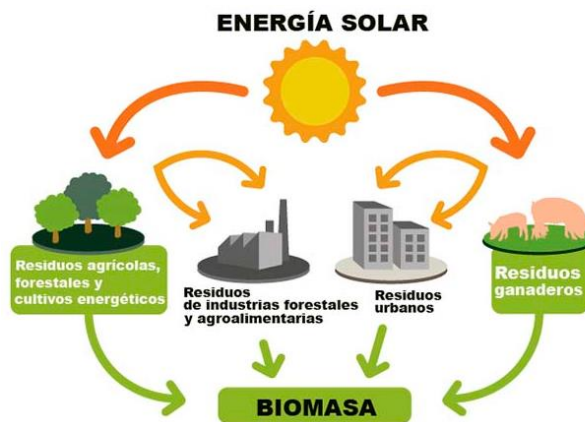


Imagen 8. Biomasa

Fuente (w ww.topcable.com)



### **2.6.1 Antecedentes históricos de la biomasa**

La biomasa es utilizada desde el principio de los tiempos, pues se trata del primer combustible empleado, esta se utilizaba para cocinar, calefaccionar y mover maquinas a vapor, por esta última y debido a la revolución industrial, a mediados del siglo XVIII, el uso de biomasa bajó de forma significativa, pues las maquinas necesitaban de mayor energía para funcionar, y comenzaron a utilizarse otros tipos de combustibles como lo son los derivados del petróleo y carbón.

A pesar de que la biomasa se utiliza desde que el hombre descubrió el fuego, esta como concepto de biomasa y materia sostenible, se comienza a utilizar en la década del setenta.

En Chile el uso de la biomasa se desarrolla, pues empresas forestales necesitaban dar uso a sus desechos, sin embargo, en 2008 se promulga la ley 20.257 “Energías Renovables No Convencionales”, la biomasa se incorpora a proyectos de la matriz energética, lo cual la hizo mucho más rentable.

Actualmente al año 2022 se gestiona en el senado un proyecto de ley que pretende regular el uso de biocombustibles sólidos, dentro de los que se encuentran la biomasa.

### **2.6.2 Tipos de biomasa**

#### **2.6.2.1 Biomasa natural**

La biomasa natural es aquella que se produce sin intervención humana, sino que espontáneamente en la naturaleza. Un ejemplo de ella es la caída de un árbol.

#### **2.6.2.2 Biomasa residual seca**

La biomasa residual seca es aquella que se genera en procesos forestales, agrícolas e industriales, tienen intervención humana. Ejemplo de esta son cascaras de almendras y pellets.

#### **2.6.2.3 Biomasa residual húmeda**

La biomasa residual húmeda es aquella que proviene de vertidos biodegradables. Ejemplo de estas son las aguas residuales.

#### 2.6.2.4 Biomasa producida

La biomasa producida es aquella que proviene de cultivos energéticos, es decir se generan campos de cultivos con el único fin de realizar un aprovechamiento energético. Ejemplo de estos son las plantaciones de girasoles y maíz.

### 2.6.3 Conversión de biomasa en energía

#### 2.6.3.1 Método Termoquímico

En este método para generar energía se utiliza calor (con materiales de baja humedad) a través de reacciones exotérmicas. Dependiendo del oxígeno ocupado en la transformación, se puede clasificar en:

- **Combustión:** En este tratamiento se quema biomasa, con oxígeno superior al teórico, entre un 20% y 40% más, a una temperatura entre 150°C y 1200°C. Se obtienen gases calientes, los que son aprovechados como energía térmica (produce calor).
- **Pirolisis:** En este tratamiento no se utiliza oxígeno, la temperatura utilizada es entre 500°C y 600°C. La materia orgánica es descompuesta por calor, se descompone en sólido, líquido y gaseoso, de esta forma se logra producir carbón vegetal.
- **Gasificación:** En este tratamiento se produce gas, mediante la disminución del oxígeno aplicado (se utiliza entre 10% y 50%), con respecto al teórico. La temperatura utilizada está entre 700°C y 1500°C. Existen dos tipos de gas, dependiendo si se utiliza aire u oxígeno, para el primero “gas de síntesis”, el cual corresponde a combustibles líquidos como la gasolina, y para el segundo “gasógeno” corresponde a gas pobre.
- **Co – combustión:** En este tratamiento, la biomasa es utilizada como acompañante del carbón en calderas mientras este se quema, reduciendo las emisiones que este genera.

#### 2.6.3.2 Métodos bioquímicos

Este método consiste en que microorganismos degraden moléculas, para generar biocombustibles, este método se clasifica en:

- **“Fermentación alcohólica.** *Es una técnica que consiste en la fermentación de hidratos de carbono que se encuentran en las plantas y en la que se consigue un alcohol (etanol) que se puede utilizar para la industria.*

- **Fermentación metánica.** Es la digestión anaerobia (sin oxígeno) de la biomasa, donde la materia orgánica se descompone (fermenta) y se crea el biogás”<sup>[3]</sup>. (Fundación Endesa, 2022)

### 2.6.3.3 Métodos químicos

En este método no se utilizan microorganismos para realizar la transformación, en este se encuentra:

- **Transformación de ácidos grasos:** Consiste en la obtención de biodiesel a través de cereales, trigo, soya, mediante procesos químicos no biológicos.

### 2.6.3.4 Métodos físicos

- **Compactación:** Consiste en reducir el volumen de la materia prima a través de su compactación, para ser utilizada directamente como combustible.
- **Secado:** La materia prima es secada, para posteriormente ser quemada.

## 2.6.4 Usos de biomasa

- **Energía térmica**

Esta da calor directamente, con sistemas de combustión. Ejemplo de este uso de energía es en calefacción de viviendas.

- **Biogás**

Este se produce por la degradación de biomasa, en ambientes carentes de oxígeno. Principalmente se produce combustible como metano, este puede generar calor o electricidad.

- **Biocombustibles**

Se utilizan como alternativa a combustibles tradicionales, entre ellos se encuentran:

- **Bioetanol:** Es un biocombustible sustituyente de la gasolina, se produce a través de cereal y remolacha.
- **Biodiesel:** Es un biocombustible sustituyente del gasoil. Ayuda mejorar la calidad de producción de energía.

- **Energía eléctrica**

Esta se genera a través de métodos de gasificación y/o combustión. La biomasa se quema produciendo vapor, el cual hace girar turbinas las que llegan a un generador, transformando energía mecánica en energía eléctrica. Esta energía logra producir hasta 50MW.

### 2.6.5 Ventajas y desventajas de la biomasa como energía térmica

Ventajas	Desventajas
<b>Precio económico</b>	<b>Generan cenizas</b>
<b>Reduce dependencia de combustibles fósiles</b>	<b>Necesitan un lugar de almacenamiento</b>
<b>Poco contaminante</b>	<b>Especialistas para mantenimiento</b>
<b>Renovable y abundante</b>	
<b>Rendimiento elevado</b>	

*Tabla 2. Ventajas y desventajas biomasa como energía térmica*

*Fuente: Propia*

### 2.6.6 Normativa relacionada con los biocombustibles sólidos en Chile

#### NORMAS RELACIONADAS CON BIOCOMBUSTIBLES SÓLIDOS

Norma	Año	Nombre
NCh-ISO17225/6	2016	Biocombustible sólidos- especificaciones y clases de combustible- Parte 6. Clase de Pellet de origen no maderero
NCh-ISO17828	2018	Biocombustible sólidos- Determinación de la densidad a granel
NCh-ISO18122	2016	Biocombustible sólidos- Determinación del contenido de cenizas
NCh-ISO18134/1	2018	Biocombustible sólidos- Determinación del contenido de humedad. Método de secado de estufa-Parte 1. Humedad total- Método de referencia.
NCh-ISO18134/2	2018	Biocombustible sólidos- Determinación del contenido de humedad. Método de secado de estufa-Parte 2. Humedad total- Método simplificado.
NCh 3246/1	2011	Biocombustible sólidos- especificaciones y clases- Parte 1. Requisitos generales

(Fuente: www.inn.cl)

*Imagen 9. Tabla normas relacionadas con biocombustibles*

*Fuente (bibliotecadigital.infor.cl)*

## 2.7 Pellet y briquetas

### 2.7.1 Pellet

Corresponden a productos elaborados, de forma cilíndrica, por lo general hechos de residuos comprimidos, estos se usan para calefaccionar, pueden ser usados tanto en estufas como en calderas, además son utilizados en sistemas de refrigeración, pues poseen un gran poder calorífero y una baja producción de cenizas al quemarse.

#### Parámetros pellet de calidad:

Característica		Pélet baja calidad	Pélet estándar	Pélet alta calidad
Poder calorífico inferior	(Kcal/Kg)	>3.000	>4.000	>4.300
	(KJ/Kg)	>12.500	>16.700	>18.000
Humedad base húmeda (% en masa)		<12	<12	<10
Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )		>1.000	1.000-1.400	>1.120
Contenido en cenizas (% en peso)		<6	<1,5	<0,5
Diámetro (mm)		<12	4-10	<8
Longitud (mm)		<7 x diámetro	<50	< 5 x diámetro

*Imagen 10. Parámetros pellet de calidad*

*Fuente (www.ecointeligencia.com)*

### 2.7.2 Briquetas

Corresponden a productos elaborados, prensados, por lo general de forma cilíndrica o de ladrillos, están hechos de material residual. Las briquetas se utilizan en sitios donde se utiliza leña, como en estufas, calderas o en actividades industriales, estas poseen gran poder calorífico y baja producción de cenizas.

### 2.7.2.1 Características físicas y químicas

- **Forma, tamaño, color**

Las briquetas tienen variadas formas y tamaños dependiendo del fabricante, pero por lo general son cilíndricas o en forma de ladrillo, existen briquetas macizas y con huecos, por lo general estas tienen una longitud entre 25 a 40 cm. Se procura que las briquetas tengan un color similar al de la madera, para que de este modo al ser quemadas ardan y parezca leña.

- **Densidad**

Las briquetas tienen una alta densidad, esta depende del método de prensado y presión utilizados para el briquetado, ya que de esto depende la cantidad de vacíos que quede entre las partículas y la materia prima utilizada, ya que a mayor densidad tenga la materia prima, mayor la densidad de la briqueta.

- **Humedad**

La humedad de la materia prima para fabricar la briqueta debe ser de 12% aproximadamente, pero en el proceso de prensado, esta pierde agua, por lo cual la briqueta sale con una humedad entre un 8% a 10%.

- **Composición química**

Esta composición depende de la materia prima empleada, si es más de un material debe conocerse el porcentaje utilizado de cada material.

- **Poder calorífico**

El poder calorífico de una briqueta depende de la materia prima utilizada, ya que este depende además de la composición química del material.

- **Combustión e inflamabilidad**

La temperatura de inflamabilidad es superior al de la leña, mientras que el tiempo de inflamabilidad es similar. En cuanto a la combustión esta es lenta, pues durante el prensado o compactado las partículas se unen, por tanto, posee menos aire en el interior. Al momento de desmoronarse, estas se queman de manera rápida.

### Parámetros briqueta de calidad:

Característica		Briquetas
Poder calorífico inferior	(Kcal/Kg)	>4.400
	(KJ/Kg)	>18.000
Humedad base húmeda (% en masa)		<10
Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )		1.200
Contenido en cenizas (% en peso)		<0,7
Diámetro (mm)		9
Longitud (mm)		26

*Imagen 11. Parámetros briqueta de calidad*

*Fuente (www.ecointeligencia.com)*

### 2.8 Aserrín

El aserrín corresponde a un residuo que se produce al serrar o cortar madera, son pequeñas partículas, las cuales pueden ser utilizadas de diferentes maneras, dentro de los que se encuentran:

- **Carpintería:** Dentro de este campo se utiliza para fabricar tableros de madera aglomerada como de fibra.
- **Higiene:** Es utilizado sobre el piso en locales donde haya humedad o derrame de líquidos, pues este absorbe.
- **Cama de animales:** Se extiende en el suelo con el fin que los animales no queden en contacto directo con la tierra.
- **Jardinería:** Se utiliza para hacer abono para las plantas.
- **Biomasa:** A través de la producción de pellet o briquetas, solo o mezclado con otro material.

## 2.9 Poder calorífico

El poder calorífico corresponde a la cantidad de energía (calor) desprendida por unidad de volumen (un metro cubico) o masa (un kilogramo) de materia (combustible) al oxidarse (quemarse) por completo.

Este se mide dependiendo del estado del combustible, las unidades más utilizadas son las siguientes:

Estado combustible	Solido	Liquido	Gaseoso
Unidad	Kcal/kg	Kcal/L	Kcal/m <sup>3</sup>

Donde: Kcal: Kilocaloría / Kg: kilogramo / L: Litro / m<sup>3</sup>: Metro cubico

*Tabla 3. Unidades más utilizadas en poder calorífico*

*Fuente propia*

### 2.9.1 Tipos de poder calorífico

Dependiendo de la forma de medirse el poder calorífico puede ser superior o inferior.

- **Poder calorífico superior (PCS):** también llamado poder calorífico neto, en este se utiliza la energía de condensación del agua, lo cual provoca que se genere más calor con menor cantidad de combustible.

En este tanto el combustible como oxígeno se toma a 0°C.

- **Poder calorífico inferior (PCI):** En este no se utiliza la condensación del agua, pues no produce cambios de fase en la materia.



### 2.9.2 Ejemplos poder calorífico de combustibles y biomásas

Para realizar una comparación entre diferentes combustibles (los cuales se encuentran en distintos estados de la materia), se realizan conversiones, de modo que todos estos tengan una unidad en común, para lo cual por lo general se utiliza Kcal/Kg o KJ/Kg, como se aprecia a continuación:

<b>Combustible</b>	<b>Poder Calorífico Superior (KJ/Kg)</b>	<b>Poder Calorífico inferior (KJ/Kg)</b>
<b>Carbón de madera</b>	35600	31300
<b>Coque</b>	33700	29300
<b>Gasolina</b>	46885	43950
<b>Petróleo Bruto</b>	47970	40895
<b>Gas Natural</b>	44000	39900
<b>Propano</b>	50450	46350

*Tabla 4. Poder Calorífico Combustibles en KJ/Kg*

*Fuente: (es.slideshare.net (tablas-tema3poder-calorifico))*

<b>Biomasa</b>	<b>Poder Calorífico Superior (KJ/Kg)</b>	<b>Poder Calorífico inferior (KJ/Kg)</b>
<b>Leñas y ramas coníferas</b>	20710	15020
<b>Serrines coníferos</b>	20417	15857
<b>Hueso de aceituna</b>	20752	16150
<b>Cascara de avellana</b>	18828	15522

*Tabla 5. Poder Calórico Biomásas en KJ/Kg*

*Fuente (http://www.observatoriobiomasa.gal/pdf/)*

### **2.9.3 Bomba calorimétrica**

La bomba calorimétrica es un aparato con el cual se puede medir el poder calorífico que tiene un combustible al momento de quemarse.

Para realizar esta medición el combustible se quema por ignición de un conductor eléctrico en cortocircuito, además se incorpora una cantidad de oxígeno, la necesaria para que inicie la combustión.

Dicha bomba es sumergida en una camisa de agua para absorber el calor liberado.

Finalmente, para realizar la medición del calor liberado se toman en cuenta factores de corrección, diferencias de temperaturas del agua del calorímetro, masa de la bomba calorimétrica y masa de combustible.

## 2.10 Hipótesis y variables

**Hipótesis 1:** El lodo negro proveniente de las plantas de tratamiento de agua servidas permite la fabricación de briquetas que presentan una geometría similar a las briquetas convencionales.

### Variables:

- **Variable independiente:** Forma de briqueta.
- **Variable dependiente:** Cantidad de compresiones.
- **Variable interviniente:** Fuerza aplicada para elaborar la briqueta.
- **Variables extrañas:** Procesos de producción utilizados.

**Hipótesis 2:** Las briquetas de lodo negro se pueden utilizar como biomasa y estas tienen un poder calorífico similar al de otras biomasas, teniendo un mayor tiempo de quemado.

### Variables:

- **Variable independiente:** Tipo de biomasa.
- **Variable dependiente:** Poder calorífico / Tiempo de quemado.
- **Variable interviniente:** Realización de estudios acabados sobre el poder calorífico y tiempo de quemado de briquetas de lodo y otras biomasas.
- **Variables extrañas:** Tipo de elaboración de distintas briquetas.

**Hipótesis 3:** Las briquetas de lodo negro con a lo más un 10% de aserrín tienen un poder calorífico y porcentaje de cenizas, similar al de biomasas convencionales.

### Variables:

- **Variable independiente:** Porcentaje de Aserrín.
- **Variable dependiente:** Poder Calorífico / Porcentaje de cenizas.
- **Variable interviniente:** Realización de estudios acabados sobre el poder calorífico de briquetas de lodo negro.
- **Variables extrañas:** Condiciones del aserrín agregado (humedad).

## CAPITULO III: MARCO METODOLÓGICO

### 3.1 Diseño de investigación

En el marco de la presente memoria se desarrolla un diseño de investigación basado principalmente en la experimentación, donde se analizará la factibilidad de elaborar briquetas con lodos negros retirados de una planta de tratamiento de aguas servidas. En dicho estudio la investigación se centrará en la ejecución de estudios de laboratorio del lodo, y posterior análisis de las propiedades físicas y químicas de las briquetas que serán elaboradas.

En dicho estudio de investigación, se abarca dos frentes de trabajo, los cuales son, en primera instancia, conocer las propiedades del lodo, para tomar conocimiento si este puede ser quemado, ya que se debe descartar que este contenga ciertas bacterias, como lo son la salmonella, los huevos de helminto y el escherichia coli.

Una vez listos estos estudios, se elaborarán briquetas para posteriormente conocer las propiedades que estas poseen, tanto propiedades físicas, como lo es la compresión según su forma, además de sus propiedades químicas, como lo es su poder calorífico y generación de cenizas.

Finalmente concluir mejoras y comprobación de hipótesis.

### 3.2 Selección de la muestra

En el laboratorio se ensayarán en primer lugar muestras de lodo seco, sin intervención, posteriormente probetas (correspondientes a briquetas elaboradas), de las cuales se harán 3 muestras por cada ensayo a realizar. Las probetas tendrán las siguientes características, se harán probetas prismáticas de  $300 \text{ cm}^3$  (10 cm x 10 cm x 3 cm), además se harán probetas de forma cilíndrica de la misma capacidad de la anterior,  $300 \text{ cm}^3$  (10 cm de diámetro x 3,8 cm de altura). Se toman probetas de distintas formas para conocer si cambian su comportamiento químico al momento de ser quemadas.

Cabe destacar, que dichas probetas se realizarán con una prensa fabricada especialmente para realizar esta investigación, la cual cuenta como elemento prensador, con una gata hidráulica de 6 toneladas y dos moldes cambiables en dicha prensa, los cuales se caracterizaron en el párrafo anterior.

Posteriormente, se seleccionará la forma de la probeta con mejor comportamiento y se analizará el comportamiento del lodo con distintos porcentajes de aserrín buscando el porcentaje más adecuado, con el cual el lodo tiene un mejor comportamiento. Se ensayarán tres probetas por cada porcentaje elegido. Partiendo con un 0% de aserrín hasta un 10% del mismo, aumentando gradualmente 5% a la vez.

### 3.3 Operacionalización de las variables

En toda investigación se presentan variables, las cuales se deben clasificar según su naturaleza, característica observable, unidad de medida y rango de variación que pueda presentar, es por esto que en la siguiente tabla se presentan las variables observables durante la investigación:

Hipótesis	Variable	Indicador	Medición	Rango variabilidad
<b>H1</b>	<b>VI:</b> Forma de briqueta.	Molde utilizado para su producción.	1.Prismática. 2.Cilíndrica.	1 ó 2
	<b>VD:</b> Cantidad de compresiones.	Compresiones efectuadas para su elaboración.	Cantidad	1-10
	<b>VIN:</b> Carga aplicada.	Carga aplicada con gata hasta llegar a su límite.	Toneladas	0 – 6 T
	<b>VE:</b> Procesos de fabricación.	Procedencia de elaboración.	1.artesanal 2.industrial	1 ó 2
<b>H2</b>	<b>VI:</b> Tipo de biomasa.	Tipo de materia prima a comparar.	1.Madera,2. Carbón 3. Aserrín, 4. Lodos.	1,2,3 ó 4
	<b>VD:</b> Poder Calorífico/ tiempo de quemado.	Niveles de poder calorífico/ tiempo en minutos.	MJ/ 1. 3 minutos, 2. 5 minutos, 3. 8 minutos, 4. 10 minutos	0 – 30 MJ / 1,2,3 ó 4
	<b>VIN:</b> Estudios de laboratorio.	Cantidad de energía liberada.	MJ	0 – 30 MJ
	<b>VE:</b> Tipo de elaboración de briquetas.	Procedencia de elaboración.	1.Artesanal 2.Industrial	1 ó 2
<b>H3</b>	<b>VI:</b> Porcentaje de Aserrín.	Porcentaje de aserrín utilizado.	%	0% - 10%
	<b>VD:</b> Poder Calorífico/ Porcentaje de cenizas.	Calor generado/ cenizas generadas	MJ / %	0 – 30 MJ / 0 – 30 %
	<b>VIN:</b> Estudios de laboratorio.	Cantidad de energía liberada y cenizas generadas.	MJ / %	0 – 30 MJ / 0 – 30 %
	<b>VE:</b> humedad.	Cantidad de agua presente.	%	0% - 15%

Tabla 6. Operacionalización de las variables

Fuente Propia

Donde:

- **H1:** Hipótesis 1.
- **H2:** Hipótesis 2.
- **H3:** Hipótesis 3.
- **VI:** Variable independiente.
- **VD:** Variable dependiente.
- **VIN:** Variable interviniente.
- **VE:** Variable extraña.

### **3.4: Trabajo desarrollado**

#### **3.4.1 Materiales y equipos**

##### **3.4.1.1 Lodo negro**

Subproducto generado en plantas de tratamiento de aguas servidas, principal materia prima para la producción de briquetas, retirado de la planta de la comuna de San Clemente.



*Imagen 12. Lodo negro*

*Fuente (Elaboración propia)*

### 3.4.1.2 Aserrín

Subproducto generado en aserraderos o madereras, materia prima a incorporar a lodo negro para la producción de briquetas.



*Imagen 13. Aserrín*

*Fuente (Elaboración propia)*

### 3.4.1.3 Lubricante

Lubricante marca Vanguard, utilizado para poner en paredes de moldes, para que lodo no se adhiera a ellas.



*Imagen 14. Lubricante*

*Fuente (Elaboración propia)*

#### 3.4.1.4 Horno de secado industrial

Horno de secado, se emplea para secar lodo negro proveniente de planta de tratamiento, aserrín y briquetas fabricadas.



*Imagen 15. Horno industrial*

*Fuente (Elaboración propia)*

#### 3.4.1.5 Prensa y moldes

Prensa, se utiliza para fabricación de briquetas, esta cuenta con una gata hidráulica de 6 toneladas y 3 moldes de diferentes formas, 1 molde cilindro y 2 moldes prismáticos.



*Imagen 16. Prensa y moldes*

*Fuente (Elaboración propia)*



### 3.4.1.6 Molinillo

Se utiliza para pulverizar briquetas de modo que se pueda hacer prueba de poder calorífico y porcentaje de cenizas de éstas.



*Imagen 17. Molinillo*

*Fuente (Elaboración propia)*

### 3.4.1.7 Mufla de quemado

Mufla, se utiliza para quemar material a una temperatura de 550°C, y obtener de esta forma solo cenizas de él.



*Imagen 18. Mufla*

*Fuente (Elaboración propia)*

### 3.4.1.8 Bomba calorimétrica

Bomba utilizada para obtener el poder calorífico superior de muestras de lodo negro, aserrín y briquetas.



*Imagen 19. Bomba calorimétrica*

*Fuente (Elaboración propia)*

### 3.4.1.9 Prensa hidráulica para ensayos mecánicos

Prensa utilizada para conocer la resistencia a la compresión y flexotracción de briquetas.



*Imagen 20. Prensa ensayos mecánicos*

*Fuente (Elaboración propia)*

### 3.4.1.10 Tamices

Tamices utilizados para conocer la composición de una muestra de lodo molido, mayor tamaño 3/8”.



*Imagen 21. Tamices*

*Fuente (Elaboración propia)*

## 3.4.2 Desarrollo de actividades

### 3.4.2.1 Retiro de lodo negro desde PTAS.

El lodo negro es retirado desde planta de tratamiento de aguas servidas de la comuna de San Clemente, para realizar esta acción, fue necesario llevar tarros de 20 litros con tapa para trasladar el material, dicho traslado se desarrolla en una camioneta, pues el lodo emana olor.

El lodo es retirado de una tolva de camión, lugar donde se deposita luego de salir del filtro de bandas.

Para poner el material en tarros, se utiliza una pala, usando todas las medidas de seguridad pertinentes por posibles infecciones, vale decir, guantes y mascarilla. Además, luego de realizar este trabajo, la pala debe ser desinfectada.



*Imagen 22. Retiro lodo desde planta.*

*Fuente (Elaboración propia)*

### 3.4.2.2 Análisis bacteriológico a lodo negro retirado de planta.

Se pide realizar un análisis bacteriológico al lodo negro, en el laboratorio de microbiología de alimentos y aguas de la Universidad de Talca para conocer si hay presencia de salmonella, estudio basado en NCh 2675.Of 2002, huevos de hermitos, según el método Sheather modificada y escherichia coli, según ISO 16649-2:2011, arrojando que este si tiene presencia de estas bacterias según se muestra en resultados:

Análisis	Resultado
Determinación de Salmonella 4g	Presencia
Huevos de helmitos viables	Ausencia
Escherichia Coli	4,7 x 10 <sup>4</sup> ufc/g

*Tabla 7. análisis bacteriológico lodo con humedad*

*Fuente/ Laboratorio de microbiología de alimentos y aguas, Universidad de Talca*

### 3.4.2.3 Secado de lodo negro

El lodo negro es secado en un horno industrial para secado de muestras (el cual fue trasladado hasta el sector “cancha de tenis” por los olores generados en el secado), este se vierte en pailas, en capas de poco grosor, ya que en capas de gran grosor el lodo formaba una capa exterior dura la cual no permitía que éste se secara en el interior. Se dejó a una temperatura de 140°C por 24 horas.

Cabe destacar que el lodo húmedo es viscoso, y el lodo seco se encuentra muy duro, además se intentó secar a 160°C, pero fue demasiado, pues se quemaba.



*Imagen 23. Secado lodo*

*Fuente (Elaboración propia)*

#### 3.4.2.4 Análisis bacteriológico a lodo negro seco.

Se pide realizar un análisis bacteriológico al lodo negro seco, en el laboratorio de microbiología de alimentos y aguas de la Universidad de Talca para conocer si las condiciones de este cambiaron, pues según estudios de la web las bacterias encontradas mueren a más de 70°C, y el lodo se secó a 140°C, de modo de poder manipularlo. Obteniendo los siguientes resultados:

Análisis	Resultado
Determinación de Salmonella 4g	Ausencia
Huevos de helmitos viables	Ausencia
Escherichia Coli	< 10* ufc/g

*Tabla 8. Análisis bacteriológico lodo seco*

*Fuente/ laboratorio de microbiología de alimentos y aguas, Universidad de Talca*

#### 3.4.2.5 Molienda de lodo

Fue necesario moler el lodo, pues al ser secado, este quedó de un tamaño grande, por tanto, se debió separar en partículas más pequeñas para prensarlo.

Para este proceso, el lodo seco se puso dentro de un saco, y fue golpeado con un martillo en repetidas ocasiones, hasta obtener material más pequeño a la vista.



*Imagen 24. Molienda de lodo*

*Fuente (Elaboración propia)*

### 3.4.2.6 Tamizado

El lodo es tamizado, con el fin de sacar un estimativo de las partículas que lo componen, para esto se tomó una muestra de 8 kilos aproximadamente de lodo negro y fue pasado por tamices, donde se pesaba la cantidad retenida en cada uno de ellos.



*Imagen 25. Tamizado*

*Fuente (Elaboración propia)*

### 3.4.2.7 Densidad lodo y aserrín

Para obtener densidades, se utiliza una probeta graduada con agua, pues se trata de sólidos irregulares, para esto se deja agua en la probeta, y se pesa el sólido. El sólido se deposita en la probeta con agua, y se utiliza la variación de volumen. De esta forma se obtiene la densidad con la siguiente fórmula.

$$\rho = \frac{m}{v_2 - v_1} \quad , \text{Ecuación 1}$$

Donde:

- $\rho$ = Densidad [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]
- $m$ = Masa [g]
- $v$ = Volumen [ $\text{cm}^3$ ]

### 3.4.2.8 Incorporación de agua a lodo y aserrín

Se incorpora agua tanto al lodo como al aserrín, para que sus partículas se unan al momento de ser prensados. Para esto se calcula la cantidad de agua necesaria, para que estos adquieran una humedad de un 12%.

Posteriormente se mide el agua calculada en una probeta, y esta es vaciada al lodo, dejando reposar éste por un periodo de 24 horas, para que la humedad se concentre en él.

La cantidad de agua a incorporar se calcula según se indica a continuación:

De la fórmula de porcentaje de humedad:

$$\% \text{ de humedad} = \frac{P_h - P_s}{P_s} * 100 \quad , \text{ Ecuación 2}$$

Donde:

- Ph: Peso húmedo de material [Kg].
- Ps: Peso seco de material [Kg].

Siendo porcentaje de humedad esperado conocido y peso seco conocido, se despeja peso húmedo de material, quedando:

$$P_h = \frac{\% \text{ de humedad} * P_s}{100} + P_s \quad , \text{ Ecuación 3}$$

De este modo conocido peso húmedo del material, se debe restar el peso seco, como la densidad del agua es igual a 1, la resta de estos pesos en [Kg], nos entrega la cantidad de agua a agregar en [L]:

$$\text{Cantidad agua} = P_h - P_s \quad , \text{ Ecuación 4}$$



### 3.4.2.9 Fabricación de briquetas de lodo negro

Se generan briquetas, tanto cilíndricas, como prismáticas, con el fin de elegir la que tenga un mejor compactado. Para la realización de estas, se utiliza una prensa.

En primer lugar, se realiza la dosificación de material necesario para fabricar briquetas de 300 cm<sup>3</sup>. Luego de esto se pesa el material, en una balanza. Se aplica un lubricante en el molde, para que el material al ser compactado no se adhiera a las paredes de este y el material se incorpora en el molde de la prensa. Finalmente se introduce el vástago del molde, entre el molde y la gata y se procede a prensar el material del interior, hasta llegar al volumen deseado, para luego contar la cantidad de compresiones que se logran dar luego de este límite. Finalmente se abre el molde y se retiran las briquetas ya formadas.

Se realizan 10 briquetas, las cuales corresponden a 5 briquetas prismáticas y 5 briquetas cilíndricas.



*Imagen 26. fabricación de briquetas de lodo negro*

*Fuente (Elaboración propia)*

### 3.4.2.10 Proceso de fabricación de briquetas de lodo negro con aserrín

Para la fabricación de briquetas se considera un volumen de 300 cm<sup>3</sup>, se fabrican dos tipos de briquetas con aserrín incorporado, primer tipo con un 5% de aserrín y segundo tipo con 10% de aserrín, por briketa, por tanto, el porcentaje de lodo y aserrín incorporado queda como se muestra a continuación según tipo:

	Volumen lodo	Volumen aserrín
5%	285	15
10%	270	30

*Tabla 9. Volumen lodo y aserrín en briquetas*

*Fuente propia*



De acuerdo con dichos volúmenes y conocida la densidad de cada material se procede a calcular la masa de material para cada tipo de briqueta con la fórmula de densidad:

$$\rho = \frac{m}{v} \quad , \text{Ecuación 5}$$

Donde despejando la masa se obtiene:

$$m = \rho * v \quad , \text{Ecuación 6}$$

Obteniendo las cantidades que se muestran a continuación:

	Masa lodo (g)	Masa aserrín (g)
5%	286,4	13,05
10%	280,8	26,10

*Tabla 10. Masa lodo y aserrín en briquetas*

*Fuente propia*

Con dicha masa se fabrican 20 briquetas, 10 de lodo con 5% de aserrín y 10 con 10% de aserrín, para posteriormente realizar pruebas tanto de poder calorífico, contenido de cenizas, como de tiempo de quemado.

Para la realización de estas primero se aplica un lubricante en el molde, para que el material al ser compactado no se adhiera a las paredes de este, luego se toma el material, se pone en el molde cilíndrico, pues este se eligió para la fabricación de estas briquetas. Se inserta el vástago entre el molde y la gata hidráulica, y se comienza a comprimir hasta alcanzar la máxima compresión que se puede aplicando fuerza. Posteriormente se retira el molde, se abre, se saca la briqueta formada.



*Imagen 27. Fabricación de briquetas con aserrín incorporado*

*Fuente (Elaboración propia)*

### 3.4.2.11 Ensayo de Poder calorífico a lodo y aserrín

Para realizar ensayos de poder calorífico, primero se muele el material a utilizar en un mortero, dejándolo lo más pulverizado posible, posteriormente se pesa 1g de material en una balanza y se ingresa al recipiente de bomba calorimétrica, a este recipiente se le inyecta oxígeno, 2500 [MPa].

Finalmente, el recipiente es puesto dentro de la bomba calorimétrica para obtener resultados de poder calorífico superior. Se deben esperar 20 minutos y esta entrega los resultados de forma automática, pues cuenta con un temporizador.



*Imagen 28. Ensayo poder calorífico*

*Fuente (Elaboración propia)*

### 3.4.2.12 Ensayo poder calorífico a briquetas

Para realizar ensayo de poder calorífico a briquetas, en primer lugar, se muelen las briquetas con un martillo de goma, como estas se desarman quedando en pedazos grandes, luego se deben moler el material en un molinillo, para dejarlas lo más pulverizadas posible. Posteriormente a través de la técnica de cuarteos se separa el material, de modo que quede homogéneo, hasta llegar a un peso de 1g de material, este gramo se ingresa al recipiente de bomba calorimétrica, a este recipiente se le inyecta oxígeno, 2500 [MPa]. Finalmente, el recipiente es puesto en la bomba calorimétrica para obtener resultados.



*Imagen 29. Ensayo poder calorífico a briquetas*

*Fuente (Elaboración propia)*

### 3.4.2.13 Porcentaje de cenizas

Para realizar ensayo para obtener porcentaje de cenizas se utiliza material pulverizado (tanto de briquetas, como de lodo y aserrín), se debe pesar 1g de material, el cual es puesto en crisoles, previamente pesados. Luego estos crisoles son ingresados a una mufla, donde permanecen a 550°C por 8 horas.

El material es convertido de esta manera en cenizas.



*Imagen 30. Ensayo porcentaje de cenizas*

*Fuente (Elaboración propia)*

### 3.4.2.14 Ensayos de resistencia mecánica

#### 3.4.2.14.1 Ensayo de resistencia a la compresión

Para realizar este ensayo se utiliza una prensa hidráulica para ensayos de compresión, donde se ubica la briqueta dentro de la máquina. Además, es necesario introducir en la maquina los datos de la briqueta a ensayar, medidas y masa de esta.

Finalmente la maquina aplica carga sobre la briqueta hasta llegar a la rotura, donde se entrega el resultado automáticamente, tanto de la carga aplicada en [KN], como de la resistencia a la compresión en [N/mm<sup>2</sup>].



*Imagen 31. Ensayo resistencia a la compresión*

*Fuente (Elaboración propia)*

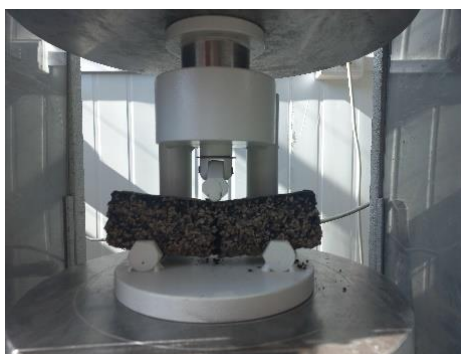
#### 3.4.2.14.1 Ensayo de resistencia a la flexo-tracción

Para realizar este ensayo se utiliza una prensa hidráulica para ensayos de resistencia mecánica, donde se selecciona el ensayo de flexo-tracción, posteriormente se ubica la briqueta dentro de la máquina.

Cabe mencionar que, para realizar este ensayo, fue necesario, confeccionar una briqueta especial, con dimensiones distintas a las briquetas utilizadas para los demás ensayos, ya que se debía utilizar un molde especial en la prensa. Las medidas de estas briquetas prismáticas son 16 cm de largo, 4 cm de ancho y 4 cm de alto.

Para realizar el ensayo, es necesario introducir en la maquina los datos de la briqueta a ensayar, medidas y masa de esta en el monitor de la prensa.

Finalmente la maquina aplica carga sobre la briqueta hasta llegar a la rotura, donde se entrega el resultado automáticamente, tanto de la carga aplicada en [KN], como de la resistencia a la compresión en [N/mm<sup>2</sup>].



*Imagen 32. Ensayo Flexo-tracción*

*Fuente (Elaboración propia)*

#### 3.4.2.15 Ensayo tiempo de quemado de briquetas

Para realizar ensayo de tiempo de quemado de briquetas en primer lugar se enciende fuego, con otra biomasa (carbón), para posteriormente incorporar la briqueta al fuego. Para iniciar el fuego, se utiliza un iniciador de fuego sólido.

Posteriormente se toma el tiempo de quemado de la briqueta, desde que se incorpora al fuego, hasta que esta se desintegra por completo.

Además, durante este proceso, se deja un recipiente con 250 ml de agua sobre una parrilla, para tomar el tiempo que demoran las briquetas en hervir el agua una vez encendidas.

Este procedimiento se realiza, para las briquetas cuadradas y cilíndricas, solo de lodo negro, y también para las briquetas de lodo negro con un 5% y 10% de aserrín.



*Imagen 33. tiempo de quemado de briquetas*

*Fuente (Elaboración Propia)*

### **3.5: Resultados primarios, iniciales**

#### **3.5.1 Humedad lodo extraído de planta:**

Los lodos negros están compuestos de sólidos y un gran porcentaje de agua. Para conocer la humedad del lodo, este se seca en el horno, de modo de conocer el valor de la masa húmeda y masa seca, los cuales, se ingresan en una fórmula, para conocer el porcentaje de sólidos y agua que este posee. Esto se analiza a través del siguiente procedimiento, ingresando los valores obtenidos de forma práctica:

Donde, valores obtenidos:

Masa inicial lodo negro: 2,296 g

Masa de agua: 1,929 g

Por tanto, una vez conocidos estos valores, se desarrollan diferentes ecuaciones para conocer el porcentaje de sólidos y agua que este contiene:

- **Masa de sólidos:**

Masa sólidos = masa lodo - masa agua

Masa sólidos = 2,296 – 1,929 , Ecuación 7

Masa sólidos = 0,367 [kg]

Conocida la masa de sólidos, se procede a obtener tanto la fracción de sólidos, como fracción de agua que posee el material:

- **Fracción de sólidos:**

$$\text{Fracción de sólidos} = \frac{\text{masa solidos}}{\text{masa lodo}}$$

$$\text{Fracción de sólidos} = \frac{0,367}{2,296} \quad , \text{Ecuación 8}$$

$$\text{Fracción de sólidos} = 0,1598$$

- **Fracción de agua:**

$$\text{Fracción de agua} = \frac{\text{masa agua}}{\text{masa lodo}}$$

$$\text{Fracción de agua} = \frac{1,929}{2,296} \quad , \text{Ecuación 9}$$

$$\text{Fracción de sólido} = 0,8402$$

Finalmente, tanto la fracción de sólidos, como la fracción de agua, es multiplicada por 100, para conocer el porcentaje de cada uno que contiene el lodo extraído de la planta:

- **Fracción de solido x 100:**

$$0,1598 \times 100 = \mathbf{15,98 \% \text{ solidos}} \quad , \text{Ecuación 10}$$

- **Fracción de agua x 100:**

$$0,8402 \times 100 = \mathbf{84,02\% \text{ agua}} \quad , \text{Ecuación 11}$$

Por tanto, la humedad que contiene el lodo extraído de la planta es de un 84,02%.

### 3.5.2 Densidad lodo negro

Para obtener la densidad del lodo negro se obtiene mediante 5 pruebas, utilizando formula de “ecuación 1”, para posteriormente sacar un promedio, donde se obtienen los siguientes resultados:

	Masa (g)	Volumen (ml)	Densidad (g/ml)
Muestra 1	25	23	1,08
Muestra 2	36	35	1,02
Muestra 3	26	25	1,04
Muestra 4	42	40	1,05
Muestra 5	47	45	1,04

Tabla 11. Densidades muestras lodo negro

Fuente propia

- Promedio densidad = 1,04 g/ml

### 3.5.3 Densidad aserrín:

Para obtener la densidad del aserrín se obtiene mediante 5 pruebas, utilizando la “ecuación 1”, para posteriormente sacar un promedio, donde se obtienen los siguientes resultados:

	Masa (g)	Volumen (ml)	Densidad (g/ml)
Muestra 1	13	15	0,87
Muestra 2	25	30	0,83
Muestra 3	18	20	0,9
Muestra 4	33	35	0,94
Muestra 5	15	18	0,83

Tabla 12. Muestras densidades aserrín

Fuente propia

- Promedio densidad = 0,87 g/ml

### 3.5.4 Tamizado lodo:

Para conocer la granulometría del lodo negro a utilizar, se toma una muestra de 8,092[Kg], este es tamizado, donde se obtienen los siguientes resultados:

Malla tamiz	Peso Retenido [g]	% Retenido	% Pasante
9,5 mm	3580,8	44,26	55,74
4,75 mm	2687,4	33,22	22,52
2,36 mm	1013,0	12,52	10,00
1,18 mm	429,2	5,31	4,69
600 mic	199,9	2,47	2,22
300 mic	100,6	1,24	0,98
150 mic	51,4	0,64	0,34
Pasa	27,8	0,34	0

*Tabla 13. Resultados de tamizado de lodo*

*Fuente propia*

### 3.5.5 Ensayo de poder calorífico y producción de cenizas de lodo negro y aserrín

Se realizar un ensayo de poder calorífico al lodo negro, sin realizar ningún tipo de modificación más que simplemente secarlo, donde se obtienen el siguiente resultado:

- **Poder calorífico: 9 [MJ]**



*Imagen 34. Poder calorífico lodo negro*

*Fuente (Elaboración propia)*



- **Porcentaje de cenizas:**

Para obtener el porcentaje de cenizas de las muestras de lodo negro y aserrín se utiliza la siguiente formula:

$$\% \text{ cenizas} = \frac{m_2 - m_0}{m_1 - m_0} * 100 \quad , \text{ Ecuación 12}$$

**Donde:**

- $m_0$  = Peso crisol.
- $m_1$  = Peso de crisol con muestra.
- $m_2$  = Peso de crisol con muestra hecha cenizas.

Se toman dos muestras de lodo para tener un resultado más fiable, y luego se saca un promedio entre ambas, dando los resultados que se muestran a continuación:

	Muestra 1	Muestra 2
$m_0$ (g)	24,9539	13,0276
$m_1$ (g)	25,9687	14,0382
$m_2$ (g)	25,1889	13,2569
% de cenizas	23,16%	22,69%

*Tabla 14. Porcentaje de cenizas lodo negro*

*Fuente propia*

**Promedio % cenizas = 22,93%**

Se realiza el mismo procedimiento para el aserrín, donde la bomba calorimétrica arroja el siguiente resultado para el poder calorífico superior:

- **Poder calorífico: 11,26 [MJ]**



*Imagen 35. Poder calorífico aserrín*

*Fuente (Elaboración propia)*

De igual modo que se realizó el estudio del contenido de cenizas del lodo negro, se realiza el estudio para el aserrín, donde luego de ingresar crisoles en la mufla se obtienen los resultados que se presentan a continuación:

	Muestra 1	Muestra 2
M0 (g)	26,2108	14,6245
M1 (g)	27,2539	15,6926
M2 (g)	26,2151	14,6306
% de cenizas	0,41	0,57

*Tabla 15. Porcentaje de cenizas aserrín*

*Fuente propia*

**Promedio % cenizas = 0,49%**

## CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 4.1 Cantidad de compresiones de briquetas

Se realiza el conteo de la cantidad de compresiones que se pueden dar en la prensa, luego que la briqueta llegue al volumen deseado, obteniendo los resultados que se muestran a continuación:

	Prismática	cilíndrica
Briqueta 1	8	7
Briqueta 2	7	7
Briqueta 3	6	8
Briqueta 4	7	8
Briqueta 5	6	9
Promedio	6,8	7,8

*Tabla 16. Compresiones briquetas*

*Fuente propia*

- **Análisis**

Según la cantidad de compresiones (Gráfico 1, anexos) que se le puede dar a cada molde luego de que ambos alcanzaran un mismo volumen, la briqueta cilíndrica es la que queda más comprimida, pues es la que se logra dejar de menor volumen, de la misma forma se puede apreciar que visualmente la briqueta cilíndrica se encuentra en mejores condiciones, como se muestra a continuación:



*Imagen 36. Inspección visual de briquetas*

*Fuente (Elaboración propia)*

De este modo se logra corroborar la hipótesis 1, pues si es posible fabricar briquetas con lodos negros de formas similares a briquetas convencionales.

## 4.2 Poder calorífico y porcentaje de cenizas diferentes composiciones de briquetas

### 4.2.1 Briquetas lodo negro

- **Poder calorífico**

Se toman 3 muestraran, las que arrojan los siguientes resultados:

Muestra 1: 16,40 MJ

Muestra 2: 16,10 MJ

Muestra 3: 15,70 MJ

- **Porcentaje de cenizas**

Se toman 3 briquetas, y se realizan dos muestras de cada una. Finalmente se saca un promedio general, arrojando los resultados que se muestran a continuación:

	M0	M1	M2	% Cenizas (%)	Promedio (%)	Promedio General (%)
<b>Briqueta 1</b>						
Muestra 1	21,4026	22,419	21,6262	22,00	21,73	21,67
Muestra 2	24,4873	25,4988	24,7044	21,46		
<b>Briqueta 2</b>						
Muestra 1	20,154	21,1919	20,3821	21,98	21,89	
Muestra 2	23,9082	24,9300	24,1309	21,79		
<b>Briqueta 3</b>						
Muestra 1	20,2322	21,251	20,4496	21,34	21,40	
Muestra 2	16,7366	17,7464	16,9534	21,47		

Tabla 17. Porcentaje de cenizas Briquetas de Lodos Negros

Fuente Propia

#### 4.2.2 Briquetas lodo negro con 5% de aserrín

- **Poder calorífico**

Se toman 3 muestras, las que arrojan los siguientes resultados:

Muestra 1: 18,42 MJ

Muestra 2: 18,92 MJ

Muestra 3: 18,54 MJ

- **Porcentaje de cenizas**

Se toman 3 briquetas, y se realizan dos muestras de cada una. Finalmente se saca un promedio general, arrojando los resultados que se muestran a continuación:

	M0	M1	M2	%Cenizas (%)	Promedio (%)	Promedio General (%)
<b>Briqueta 1</b>						
Muestra 1	24,0647	25,0690	24,2839	21,82	21,79	21,63
Muestra 2	16,7635	17,7663	16,9816	21,75		
<b>Briqueta 2</b>						
Muestra 1	26,2122	27,2212	26,4287	21,45	21,38	
Muestra 2	20,4093	21,4124	20,6328	21,30		
<b>Briqueta 3</b>						
Muestra 1	23,9056	24,9069	24,1242	21,83	21,73	
Muestra 2	18,4617	19,4670	18,6791	21,63		

Tabla 18. Porcentaje de cenizas Briquetas de Lodos Negros con 5% de aserrín

Fuente propia

### 4.2.3 Briquetas lodo negro con 10% de aserrín

- **Poder calorífico**

Se toman 3 muestras, las que arrojan los siguientes resultados:

Muestra 1: 17,45 MJ

Muestra 2: 17,10 MJ

Muestra 3: 17,35 MJ

- **Porcentaje de cenizas**

Se toman 3 briquetas, y se realizan dos muestras de cada una. Finalmente se saca un promedio general, arrojando los resultados que se muestran a continuación:

	M0	M1	M2	% Cenizas (%)	Promedio (%)	Promedio General (%)
<b>Briqueta 1</b>						
Muestra 1	14,6253	15,6278	14,8265	20,07	20,05	20,78
Muestra 2	22,3151	23,3185	22,5160	20,02		
<b>Briqueta 2</b>						
Muestra 1	16,7634	17,7822	16,9715	20,43	21,04	
Muestra 2	26,2116	27,2177	26,4295	21,66		
<b>Briqueta 3</b>						
Muestra 1	18,6128	19,6241	18,8275	21,23	21,26	
Muestra 2	23,8941	24,9017	24,1086	21,29		

Tabla 19. Porcentaje de cenizas Briquetas de Lodos Negros con 10% de aserrín

Fuente propia

#### 4.2.4 Resumen resultado final y análisis

	Poder calorífico Promedio (MJ)	Porcentaje cenizas promedio (%)
<b>Briqueta lodo negro</b>	<b>16,07</b>	<b>21,67</b>
<b>Briqueta Lodo y 5% aserrín</b>	<b>18,63</b>	<b>21,63</b>
<b>Briquette Lodo y 10% aserrín</b>	<b>17,30</b>	<b>20,78</b>

*Tabla 20. Resumen resultados poder calorífico y porcentaje de cenizas*

*Fuente propia*

- **Análisis**

El aserrín, genera una leve mejora en cuanto a la producción de cenizas de las briquetas, pues reduce la cantidad de esta, a mayor cantidad de aserrín menor cantidad de cenizas, no obstante, no produce el mismo efecto en cuanto al poder calorífico, pues este encuentra su óptimo en la briketa que tiene un 5% de aserrín, siendo mejor este porcentaje que con un 10%.

Además, destacar que, de manera artesanal, como se realizó esta memoria, las briquetas de lodo negro con aserrín, no pueden superar el 10% de este, pues si superan este porcentaje, la briketa se desintegra por completo, ya que los elementos no se adhieren entre sí, y no se compacta lo suficiente, como se muestra a continuación:



*Imagen 37. Briketa 10% de aserrin v/s 50% de aserrín*

*Fuente (Elaboración propia)*

Corroborando de esta manera la hipótesis 2 y 3, demostrando que las briquetas de lodo negro y las briquetas con lodo negro y aserrín tienen poderes caloríficos similares al de biomásas convencionales, encontrándose su óptimo en un agregado de 5% de aserrín.

### 4.3 Resistencia mecánica de briquetas

Se toman briquetas tanto de lodo negro, como con 5% y 10% de aserrín y se realizan pruebas de compresión obteniendo los siguientes resultados:

<b>TIPO DE BRIQUETA</b>	<b>Carga aplicada (KN)</b>	<b>Resistencia a la compresión (N/mm<sup>2</sup>)</b>
Briqueta lodo negro cuadrada	9,09	1,16
Briqueta lodo negro cilíndrica	18,86	2,40
Briqueta lodo negro y 5% aserrín	25,22	3,21
Briqueta lodo negro y 10% aserrín	10,24	1,30

*Tabla 21. Resistencia a la compresión de briquetas*

*Fuente Propia*

- **Análisis**

Siendo la briketa de lodo negro con 5% de aserrín la más resistente a la compresión, y obteniendo un valor aceptable de 3,21 [N/mm<sup>2</sup>] y una carga máxima de 25,22 [KN].

Se realiza un ensayo por tipo de briketa, pues el equipo utilizado, es utilizado para ensayos de hormigón, por lo cual no es el mas adecuado, para ensayar briquetas.

Además, se realizan 3 probetas especiales, de lodo negro para medir la resistencia de estas a la flexo-tracción, obteniendo los siguientes resultados:

<b>Número muestra</b>	<b>Carga aplicada (KN)</b>	<b>Resistencia a la flexo- tracción (N/mm<sup>2</sup>)</b>
<b>Muestra 1</b>	0,40	0,94
<b>Muestra 2</b>	0,46	1,08
<b>Muestra 3</b>	0,44	1,03

*Tabla 22. Resistencia a la flexo-tracción de briquetas*

*Fuente propia*



- **Análisis**

Este ensayo se realiza para conocer las propiedades del lodo negro a la flexo-tracción al estar comprimido, ya que las probetas que se ensayaron fueron realizadas con diferentes dimensiones que las briquetas utilizadas durante todo el desarrollo de la memoria, dando en promedio una resistencia en promedio de 1,02 [N/mm<sup>2</sup>], soportando una carga promedio de 0,43 [KN], valores adecuados considerando que las briquetas serán quemadas. Además, se puede establecer que las briquetas si pueden ser apiladas unas sobre otras.

#### 4.4 Tiempo de quemado de la briqueta

Se realiza una prueba de quemado de la briqueta, obteniendo los siguientes resultados:

<b>Tipo de briqueta</b>	<b>Tiempo de combustión (minutos)</b>
Briqueta lodo negro	57
Briqueta lodo negro con 5% de aserrín	80
Briqueta lodo negro con 10% de aserrín	72

*Tabla 23. Tiempo de combustión de briquetas en minutos*

*Fuente propia*

Además, se toma el tiempo en que el agua logra hervir, obteniendo los resultados mostrados a continuación:

<b>Tipo de briqueta</b>	<b>Tiempo de evaporación del agua (minutos)</b>
Briqueta lodo negro	20
Briqueta lodo negro con 5% de aserrín	31
Briqueta lodo negro con 10% de aserrín	29

*Tabla 24. Tiempo de evaporación de agua*

*Fuente propia*

- **Análisis**

En primer lugar, es importante destacar que, al intentar encender las briquetas con un iniciador de fuego, estas no encendían, ya que, al apagarse dicho iniciador, las briquetas solo emanaban humo, por lo cual se decide utilizar otra biomasa (carbón) para que las briquetas permanecieran encendidas, y fuera posible quemarlas.



*Imagen 38. Briquetas con iniciador de fuego*

*Fuente (Elaboración propia)*

Además, es importante mencionar que luego de 40 minutos, las briquetas toman aspecto de carbón, pues presentan un color negro, encendidas en el centro, toman un color rojizo, de braza y producen cenizas.



*Imagen 39. Briqueta pasados 40 minutos*

*Fuente (Elaboración propia)*

Respecto al tiempo de quemado de las briquetas es posible afirmar, que la briqueta que tiene un mayor tiempo de quemado es la briqueta de lodo negro con 5% de aserrín, sin embargo, también es la que más demoró en hervir 250 ml de agua.

Con respecto al aspecto de carbón producido, las briquetas solo de lodo negro se desintegran, produciendo pequeños carbones, débiles, mientras que las briquetas con un 5% de aserrín, tenían un aspecto de carbón más grande y duro, y las briquetas con un 10% de aserrín, dan un aspecto de un carbono aún más grande, fuerte y duro que las briquetas con un 5% de aserrín.

Destacar, además, que el olor que emanan las briquetas al ser quemadas es olor a humo normal, no generan otros tipos de malos olores, sin embargo, emanan humo en demasía, lo cual es molesto para las personas que se encuentran en las cercanías.

Las briquetas con 10% de aserrín son las que generan menos llama al momento de encenderse y las briquetas de lodo sin aserrín son las que generan más llama al ser encendidas.

Finalmente mencionar, que las briquetas si transmiten energía calórica, ya que fue posible hervir agua con ellas, en un tiempo prudente.

## CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Finalmente, las conclusiones obtenidas de esta memoria hacen alusión tanto a los objetivos planteados como a las hipótesis generadas:

En primer lugar fue posible identificar 2 métodos para disminuir el agua del lodo, con fines investigativos, los cuales son secado al sol, el cual no fue factible puesto que luego de unos días el agua no disminuía lo suficiente y en el lodo aparecían hongos de color blanco, el segundo método identificado fue realizar un secado en horno industrial, el cual si da resultados, sin embargo, esto se puede realizar en pequeñas cantidades de lodo, por tanto es un trabajo que toma tiempo, además de generar malos olores.

Posteriormente se identifica por medio de investigaciones y además de forma práctica, que el porcentaje óptimo de humedad para fabricar briquetas de lodo es de entre un 8% y 12%, a pesar de que, al momento de secarlo, se dejó con un 0% de humedad, y luego se incorporó agua a este para llegar a la humedad deseada. Además, al realizar análisis fisicoquímico al lodo en primera instancia, se detecta que si es factible que este sea quemado por la cantidad de materia orgánica que posee, esto se logra conocer a través de pruebas para obtener el porcentaje cenizas producidas, así como también al realizar pruebas de poder calorífico para determinar su rendimiento.

En cuanto a la utilización del lodo como biomasa, se opta por generar eco briquetas con él, por temas de equipos, ya que se contaba con una prensa para generarlas, no así con un equipo para generar pellet, a pesar de que era factible la producción de estos si se hubiera contado con los equipos necesarios.

En relación con las hipótesis los lodos negros si pueden ser utilizados para la generación de briquetas, siempre que este tenga un porcentaje de humedad entre un 8% y un 12%, ya que al ser un material que al secar endurece, con una humedad menor a 8% las partículas no se adhieren entre sí, y al tener una humedad superior al 12% las partículas se saturan de agua y el material colapsa al ser compactado.

Es importante destacar que fue posible comprobar, que las briquetas de lodo negro, sí tienen un poder calorífico similar al de biomásas convencionales, con un menor tiempo de quemado, por tanto son menos eficientes, sin embargo al incorporar un aserrín en ellas, las propiedades de las briquetas mejoran considerablemente, encontrando el óptimo de mejora al incorporar un 5% de aserrín en ellas, ya que tanto la resistencia a la compresión como el poder calorífico mejoran, no así el porcentaje de cenizas, el cual con un 10% es mejor, sin embargo la diferencia en cuanto al porcentaje es solamente de un 0,85%.

A modo de recomendación se puede mencionar que, para fabricar briquetas, es necesario buscar un mejor sistema de secado, ya que el horno es un sistema que no da abasto para grandes cantidades de lodo. Además, se recomienda buscar un método que disminuya el olor emanado por los lodos al secarse, pues estos a pesar de no ser tóxicos, según otros autores, si son muy molestos.

Los posibles usos del lodo como biomasa son factibles, pues es un elemento que, si se logra moldear en forma de briquetas, sin embargo, se debe tener en consideración lo mencionado anteriormente para perfeccionar su utilización.

Finalmente, los alcances que se espera de este proyecto, es que los lodos puedan ser quemados y darles una utilización a futuro para que no lleguen solamente a rellenos sanitarios.

## BIBLIOGRAFÍA

-Ministerio Secretaría General de la Presidencia de la República de Chile, DS N°90. (2000). *Norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales.* [1]

-Ministerio Secretaría General de la Presidencia de la República de Chile, DS N°4. (2009). *Reglamento para el manejo de lodos generados en plantas de tratamiento de aguas servidas.*[2]

-Fundación Endesa. (2022). Centrales de biomasa y sus tipos. <https://www.fundacionendesa.org/es/educacion/endesa-educa/recursos/centrales-renovables/central-de-biomasa#:~:text=Biomasa%20producida,finalidad%20de%20su%20aprovechamiento%20energ%C3%A9tico.>[3]

- **Imágenes**

-Planta de tratamiento Iloca (2021). [Imagen 1]. La prensaAvanza nueva planta de tratamiento en Iloca. <https://new.diariolaprensa.cl/index.php/2021/08/27/avanza-nueva-planta-de-tratamiento-en-iloca/>

-Decanter. (2022). [Imagen 2]. Direct industry. Decantador centrífugo C-Series. <https://www.directindustry.es/prod/flottweg-se/product-28713-1765105.html>

-Filtro de bandas. (2022). [Imagen 3]. DLC.S.A. Tratamiento de aguas. <https://www.dlc.cl/wp-content/themes/dlc/archivos/filtros.pdf>

-Eras de secado. (2022). [Imagen 4]. Cidta Universidad de Salamanca. Tratamiento de aguas residuales. [https://cidta.usal.es/cursos/simulacion/modulos/curso/uni\\_08/u8c8s3.htm](https://cidta.usal.es/cursos/simulacion/modulos/curso/uni_08/u8c8s3.htm)

-Componentes sistema de lodos activados (2022) [Imagen 5]. Iagua. *¿qué es un sistema de lodos activados?* <https://www.iagua.es/respuestas/que-es-sistema-lodos-activados>

-Componentes laguna aireada. (2009). [Imagen 6]. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad del Bío-Bío. *Localización de Plantas de Tratamiento de Lodos de la Empresa de Servicios Sanitarios del Bío Bío.*

-Tabla 1 Extraída de DS N°90/00. (2000). [Imagen 7]. Ministerio Secretaría General de la Presidencia de la República de Chile, DS N°90. (2000). *Norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales.*

-Biomasa. (2020). [Imagen 8]. Top Cable. <https://www.topcable.com/blog-electric-cable/la-biomasa-fuente-de-energia-renovable-de-gran-potencial/>

-Tabla normas relacionadas con biocombustibles. (2021). [Imagen 9]. *NORMATIVAS APLICABLES A LA PRODUCCIÓN DE PELLETS EN CHILE.* <https://bibliotecadigital.infor.cl/bitstream/handle/20.500.12220/31344/31344.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

-Parámetros pellet de calidad. (2014). [Imagen 10]. Eco inteligencia. <https://www.ecointeligencia.com/2014/12/guia-biomasa-para-tu-casa-3/>

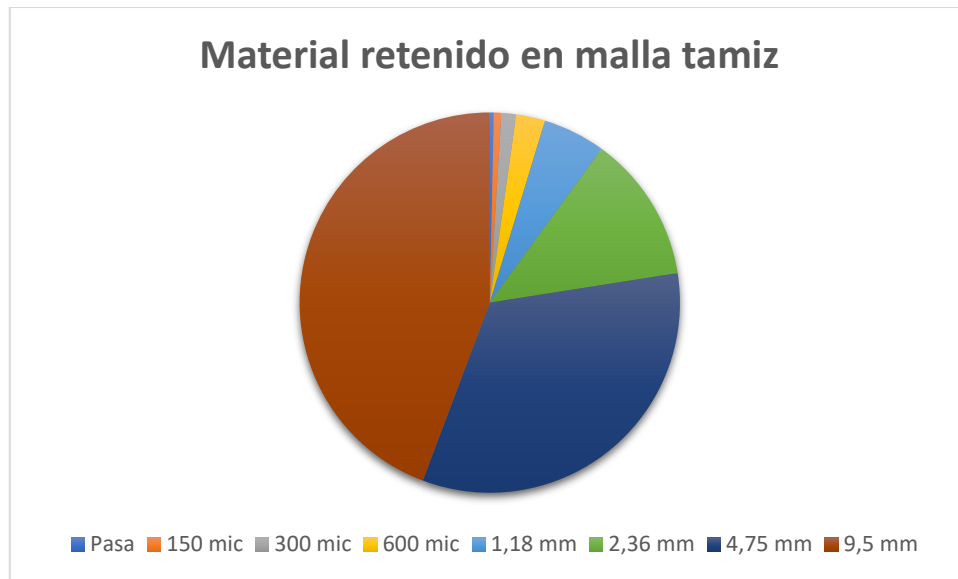
-Parámetros briqueta de calidad. (2014). [Imagen 11]. Eco inteligencia. <https://www.ecointeligencia.com/2014/12/guia-biomasa-para-tu-casa-3/>

- **Tablas**

-Poder Calorífico Combustibles en KJ/Kg (2014). [Tabla 4]. Tablas poder calorífico. <https://es.slideshare.net/yesicanelida/tablas-tema3poder-calorifico>

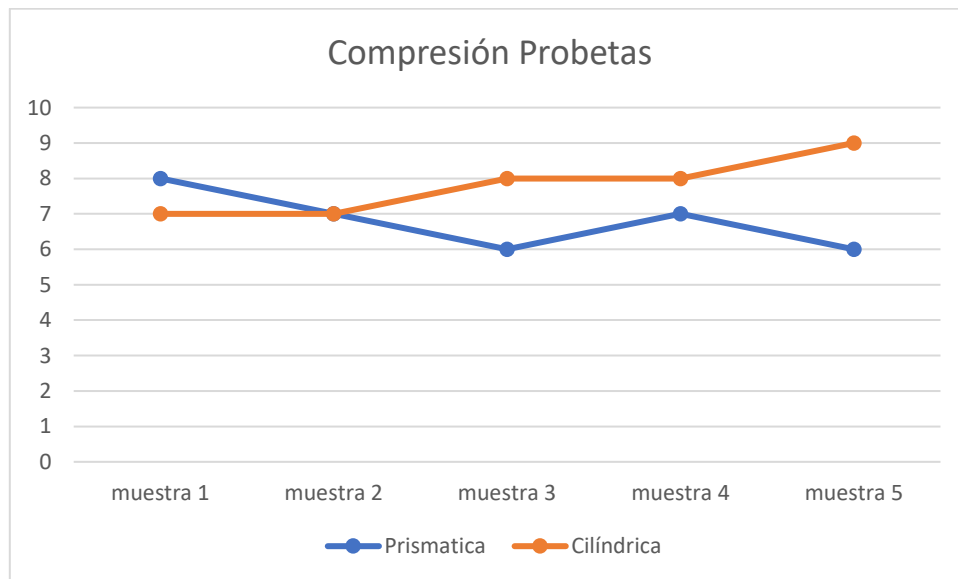
-Poder Calorífico Biomásas en KJ/Kg (2015). [Tabla 5]. Conocimiento de los combustibles. [http://www.observatoriobiomasa.gal/pdf/modulo2\\_conocimiento\\_combustibles.pdf](http://www.observatoriobiomasa.gal/pdf/modulo2_conocimiento_combustibles.pdf)

## ANEXOS



*Gráfico 1. Material retenido en tamices*

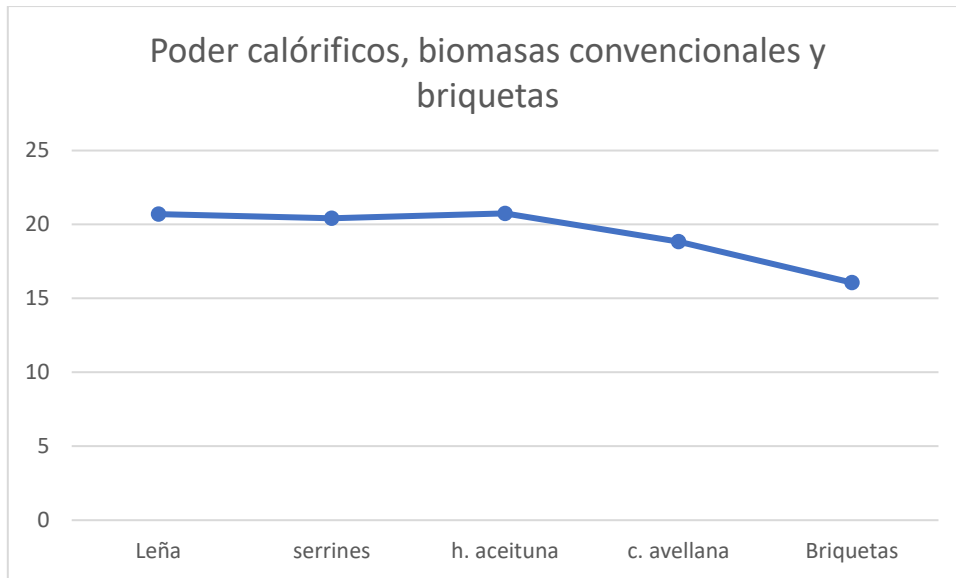
*Fuente propia*



*Gráfico 2. Cantidad de compresiones según forma probetas*

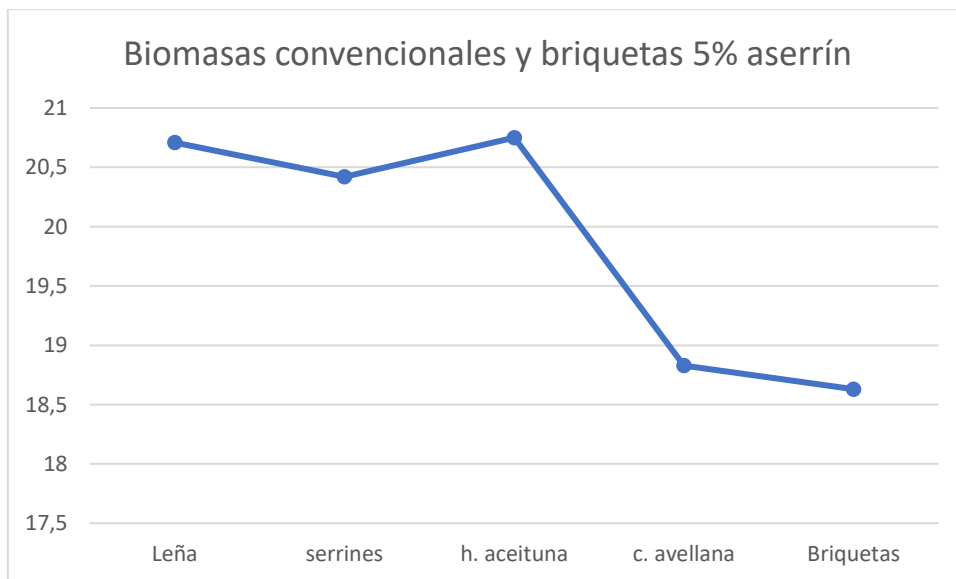
*Fuente propia*





*Gráfico 3. Poder calórico biomásas convencionales y briquetas de lodo negro*

*Fuente propia*



*Gráfico 4. Poder calórico biomásas convencionales y briquetas con 5% aserrín*

*Fuente propia*

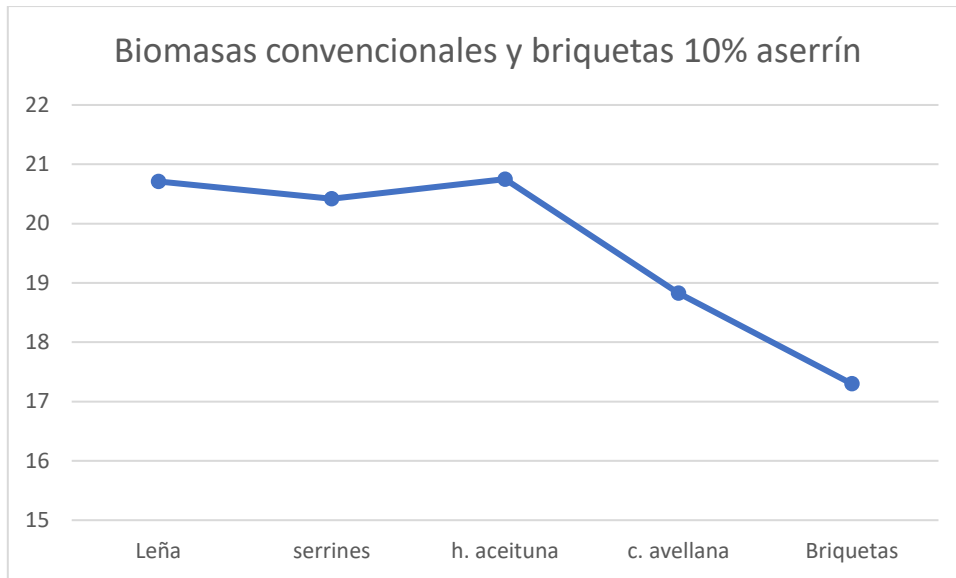


Gráfico 5. Poder calorífico biomosas convencionales y briquetas con 10% aserrín

*Fuente propia*

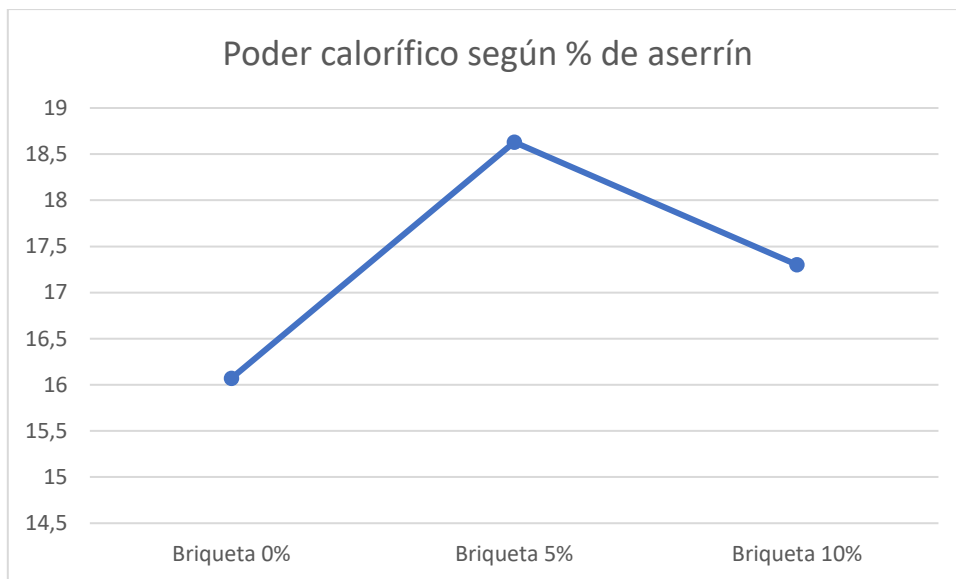


Gráfico 6. Poder calorífico briquetas, según % de aserrín agregado

*Fuente propia*