Diseño de planta piloto para obtener ladrillos de construcción a partir de lodos de potabilización de agua

Yulieth Jimena Duran Pinto

Trabajo de Grado para optar el título de Ingeniero Químico

Director

Prof. Walter Pardavé Livia

Ingeniero Metalúrgico MSc

Codirector

Prof. Pedro Delvasto

Doctor en Ciencia y Tecnología de materiales

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2025

Dedicatoria

Quiero dedicar este trabajo primeramente a Dios, ese ser supremo que me ha dado la vida, salud, sabiduría, entendimiento, fortaleza, que me bendice en todo momento y me ayuda diariamente a vencer los desafíos que se me presentan en mi vida.

A mis padres Carmen Pinto y Luis Duran, a mis hermanos Nelson, Juliana y Ronaldo, por su apoyo incondicional, además de que han sido piezas fundamentales para llegar a este momento.

A todos mis compañeros y amigos que estuvieron desde el principio hasta hoy, en especialmente mi amiga Steffany Monsalve y Javier Mariño, por su gran ayuda, apoyo y colaboración en este trabajo.

Agradecimientos

Deseo expresar mi más profundo agradecimiento a todas las personas que hicieron posible la realización de este proyecto de grado. En primer lugar, quiero agradecer especialmente a mi director de tesis, Msc Walter Pardavé, por su orientación, paciencia y apoyo a lo largo de este proceso. Sus concejos y retroalimentaciones fueron esenciales para dar forma a este trabajo, sin importar las circunstancias siempre estuvo atento ante cualquier inquietud.

También agradezco a mi profesor Dr. Pedro Delvasto, Al equipo de laboratorio de Materiales Refractarios a cargo del técnico Sergio y al de Beneficio de minerales a cargo del técnico Javier Gaitán, por sus enseñas brindadas durante la parte experimental de este proyecto las cuales fueron muy enriquecedoras.

Agradezco enormemente a mi familia por sus concejos, compresión y compañía en este arduo camino donde me forjaron hacia la excelencia a pesar de los desafíos presentes a lo largo de esta etapa académica.

A mi amiga Steffany Monsalve, y en especial a mi amigo Javier Mariño quien me acompaño desinteresadamente en el desarrollo experimental de este proyecto, a mis amigos y compañeros de clase por su amistad, motivación y palabras de aliento en los momentos difíciles.

A todos, mi más sincero agradecimiento por haber sido parte esencial de este logro.

Tabla de contenido

Introducción 11
1. Objetivos 13
1.1 Objetivo General 13
1.2 Objetivos Específicos 13
2. Estado del arte 14
2.1 Caracterización de los lodos de potabilización del agua 15
2.2 Pruebas de absorción 15
2.3 Prueba de compresión 16
2.4 Proceso de elaboración de ladrillo de la mezcla que incluye lodo de potabilización de agua 16
3. Metodología 18
3.1 Revisión Bibliográfica: 18
3.2 Recolección de Muestras: 19
3.3 Caracterización del lodo: 19
3.3.1 DRX 19
3.3.2 Granulometría 19
3.4 Prueba de absorción en agua 20
3.5 Prueba de compresión de material de ladrillo basado en NORMA ICONTEC 23
3.6 Proceso de elaboración de ladrillo a partir de mezcla que incluye lodo 26
3.6.1 Secado del lodo 26
3.6.2 Trituración y molienda 26
3.6.3 Tamizado 28
3.6.4 Peletización 28
3.6.5 Mezcla 29
3.6.6 Moldeo 31
3.6.7 Secado 31
4 Resultados 32
4.1 Caracterización de lodos del proceso de potabilización de la planta Bosconia del AMB 32
4.1.1 Granulometría 34
4.1.2 Caracterización microscópica y SEM 36

4.2 Pruebas 37
4.2.1 Absorción en agua 37
4.2.2 Prueba de compresión 40
4.3 Balance de material 41
4.4 Dimensionamiento de equipos 42
4.5 Evaluación económica de fabricación de ladrillos macizos a partir de lodos de potabilización de agua 43
4.5.1 Monto de inversión y costo de la planta 44
4.5.2 Análisis económico básico 45
4.4 Diseño 3D de la Planta Piloto 46
5 Conclusiones 48
6 Recomendaciones 49
Referencias 50

Lista de Figuras

Figura 1 *Flujograma proceso experimental* 18
Figura 2 *Presión de compacto* 21
Figura 3 *Cocción de muestras durante dos horas* 21
Figura 4 *Peso sumergido* 22
Figura 5 *Secado de muestra* 22
Figura 6 *Peso saturado* 23
Figura 7 *Mezcla* 25
Figura 8 *Llenado de moldes* 25
Figura 9 *Resistencia a la compresión 7 días de 50% reemplazo agregado* 26
Figura 10 *Trituración molino de bolas* 27
Figura 11 *Extracción del lodo molido* 27
Figura 12 *Peletización* 28
Figura 13 *Pellets 4-6mm* 29
Figura 14 *Mezcla de prueba de absorción* 30
Figura 15 *Mezcla de prueba resistencia a la compresión* 30
Figura 16 *Moldeo de morteros* 31
Figura 17 *Granulometría* 35
Figura 18 *Difracción de rayos X* 35
Figura 19 *Imágenes de estereoscopía para determinar liberación de partículas sólidas en el lodo* 37
Figura 20 *Pesos promedios muestra vs etapa de muestreo de proporción de especímenes como sustituto de arena fina* 39
Figura 21 *Flujograma y balance de materia prima para 15 toneladas* 41
Figura 22 *Vista frontal planta 3D* 46
Figura 23 *Vista panorámica planta 3D* 47
Figura 24 *Vista superior planta 3D* 47

Lista de tablas

Tabla 1 *Resistencia a la compresión: Norma NTC 4026* 24
Tabla 2 *Resistencia a la compresión: Norma NTC 4076*..... 24
Tabla 3 *Composición química y propiedades físicas de los lodos de filtración del proceso de potabilización de la planta Bosconia AMB* 33
Tabla 4 *Granulometría*..... 34
Tabla 5 *Muestra antes de inmersión*..... 38
Tabla 6 *Peso suspendido*..... 38
Tabla 7 *Peso saturado*..... 38
Tabla 8 *Promedio de los pesos* 39
Tabla 9 *Prueba de resistencia a la compresión*..... 40
Tabla 10 *Dimensionamiento de equipos* 42
Tabla 11 *Dimensión y costo unidad de ladrillo fabricado a través de relaves* 43
Tabla 12 *Inversiones fijas* 44
Tabla 13 *Capital de trabajo*..... 44
Tabla 14 *Ingresos percibidos*..... 45
Tabla 15 *Información para el análisis económico*..... 45

Lista de apéndices

Apéndice A *Resistencia a la compresión 14 días* 53
Apéndice B *Muestra después de la compresión* 53
Apéndice C *Inmersión en agua 7, 14, 21 y 28 días* 54
Apéndice D *Tamaño vs acumulado pasante* 54
Apéndice E *Documento visualización planta 3D* 55

Resumen

Título: Diseño de planta piloto para obtener ladrillos a partir de lodos de potabilización de agua*

Autor: Yulieth Jimena Duran Pinto**

Palabras Clave: Lodos de potabilización, planta, aprovechamiento, sostenible, Norma Técnica Colombiana, peletización y planta piloto.

En este estudio se exploró la viabilidad de utilizar lodos procedentes de la planta industrial de potabilización de aguas de Bosconia transformando a material de construcción. Estos lodos, comúnmente dispuestos de forma inadecuada, contienen compuestos como sulfato de aluminio y policloruro de aluminio que representan riesgo ambiental. Debido a esta problemática, se propone aprovechamiento como materia prima en la producción de ladrillos, bajo enfoque sostenible. Se llevo a cabo mediante la caracterización física, química y granulométrica de los lodos, así como la formación de mezclas. Se realizaron pruebas de absorción en agua y resistencia a la compresión conforme a normas técnicas colombianas. Posteriormente se diseñó la planta piloto 3D considerando las etapas del proceso: secado, molienda, tamizado, paletización, mezcla, moldeo y secado, así como también el dimensionamiento de equipos, estudio económico básico y estimación de la producción anual. Los resultados revelaron que los materiales elaborados con los lodos de la planta de potabilización de aguas no alcanzo las propiedades necesarias para cumplir con los estándares estructurales requeridos por las NTC. Este estudio sugiere que, aunque los lodos no resultaron adecuados como material de construcción debido a sus limitaciones mecánicas, se podría explorar como recursos útiles en aplicaciones donde se requiera propiedades especificas no estructurales, representando así una opción sostenible y económica para los lodos generados en planta de tratamiento de aguas.

---

* Trabajo de grado presentado para optar al título de Ingeniera Química.

** Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Universidad Industrial de Santander. Dirigido por: Walter Pardavé. Codirector: Pedro Luis Delvasto. Bucaramanga, 2025.

Abstract

Title: Design of a Pilot Plant for Producing Bricks from Water Treatment Sludge*
Author: Yulieth Jimena Duran Pinto**
Keywords: Drinking water sludge, plant, utilization, sustainable, Colombian Technical Standard, pelletization and pilot plant.

This study explored the feasibility of using sludge from the Bosconia industrial water treatment plant as a construction material. This sludge, often improperly disposed of, contains compounds such as aluminum sulfate and polyaluminum chloride, which pose environmental risks. Due to this issue, its use as a raw material for brick production is proposed under a sustainable approach. The project was carried out through the physical, chemical, and granulometric characterization of the sludge, as well as the formation of mixtures. Water absorption and compressive strength tests were conducted by Colombian technical standards. Subsequently, a 3D pilot plant was designed, considering each stage of the process: drying, grinding, sieving, pelletizing, mixing, molding, and drying, as well as equipment sizing, CAPEX and OPEX calculation, and annual production estimation. The results revealed that the materials produced with sludge from the water treatment plant did not achieve the necessary properties to meet the structural standards required by the NTC. This study suggests that, although the sludge proved unsuitable as a structural construction material due to its mechanical limitations, it could be explored as a useful resource in applications requiring specific non-structural properties, thus representing a sustainable and economical alternative for the sludge generated in water treatment plants.

---

* Thesis submitted for the title of degree of Chemical Engineer.
** Faculty of Physicochemical Engineering. School of Chemical Engineering. Industrial University of Santander. Supervised by: Walter Pardavé. Co-supervised by: Pedro Luis Delvasto. Bucaramanga, 2025.

Introducción

La industria de la construcción en Colombia constituye uno de los pilares del desarrollo económico y social del país, generando empleo, infraestructura y crecimiento urbano. Dentro de esta industria, el ladrillo sigue siendo uno de los materiales más utilizados desde la antigüedad gracias a sus propiedades de durabilidad, versatilidad y resistencia. A nivel nacional, se estima una producción de más de un millón de toneladas de ladrillos mensuales, en departamentos como Boyacá, Cundinamarca y Valle del Cauca concentrando el 62 % de esta actividad (Dirección de asuntos ambientales, 2021). Sin embargo, a medida que este sector crece, también se genera la necesidad de adoptar procesos más sostenibles y responsables con el medio ambiente, especialmente en lo relacionado con el uso de materias primas y la gestión de residuos.

No obstante, al ser una industria que anualmente va en crecimiento, al igual que el tratamiento de agua potable mediante sistemas convencionales y plantas, también ha presentado un incremento constante, generando grandes cantidades de lodos residuales, especialmente por el uso de coagulantes como el sulfato de aluminio o el policloruro de aluminio (Quiroga, 2018) (Tarique Ahmad, 2016). Estos lodos, al no recibir un manejo adecuado, suelen ser vertidos en cuerpos de agua o almacenados en terrenos, ocasionando afectaciones ambientales significativas (James Keeley, 2016) (Torres, 2023). En este ámbito se plantea la urgencia de buscar soluciones sostenibles que permitan su aprovechamiento y transformación en nuevos productos útiles, conforme a los principios de economía circular.

Diversos estudios han explorado el uso de residuos industriales como materia prima para la elaboración de materiales de construcción (R & A., 2010). Aprovechar los lodos de potabilización para la fabricación de ladrillos no solo contribuiría a reducir su impacto ambiental, sino que también ofrecería una alternativa innovadora para suplir la demanda del sector ladrillero, generando un doble beneficio ambiental y económico.

Este trabajo de grado se plantea como propuesta para responder a esa necesidad, con el fin de diseñar una planta piloto eficiente y sostenible, que permita transformar los lodos generados en el proceso de potabilización de agua en ladrillos de construcción, cumpliendo con las normativas técnicas colombianas. Para así contribuir a una gestión ambiental responsable de estos residuos, al tiempo que se fomenta el desarrollo de tecnologías limpias aplicadas a la construcción (Rafael, 2022). De este modo, surge en cuestionamiento de:

¿Cómo diseñar una planta piloto eficiente y sostenible para la producción de ladrillos de construcción no estructural utilizando lodos generados en los procesos de potabilización de agua, mitigando los impactos ambientales asociados a su disposición actual y maximizando su aprovechamiento como materia prima?

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

- Diseñar una planta piloto de 15TPD para fabricar ladrillos no estructurales a partir de lodos de potabilización de agua, mediante herramientas de simulación 3D.

1.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar física, química, mineralógica, granulométrica y microscópicamente los lodos de potabilización de agua.
- Establecer el flujograma y balance de materiales del circuito de obtención de ladrillos a partir de lodos de potabilización de agua.
- Diseñar por medio de herramientas 3D la planta piloto del proceso de obtención de ladrillos no estructurales a partir lodos de potabilización de agua

2. Estado del arte

La industria de la construcción sigue en aumento y depende de recursos naturales. Por ello, es importante aprovechar los lodos de potabilización, que suelen desecharse debido a su alto volumen. A nivel mundial, se generan unas 10,000 toneladas diarias de residuos sólidos secos, lo que representa un desafío para su adecuado tratamiento, (Minh Duc, 2022) los cuales traen agentes contaminantes para el medio ambiente como lo es el sulfato de aluminio o policloruro de aluminio, empleados como coagulantes durante el proceso de potabilización.

En muchas plantas potabilizadoras de Latinoamérica, los lodos son descargados directamente a cuerpos de agua sin ningún tipo de tratamiento (Medina & Arteaga, 2022), generando un impacto ambiental significativo. Estudios como el realizado en la planta Herminia Cabello Sánchez en Ecuador, revelan que estos lodos contienen una alta concentración de aluminio (hasta 32,313.69 mg Al/Kg de lodo) y su manejo inadecuado puede afectar la calidad del agua superficial, limitando su uso para fines domésticos, agrícolas e industriales. Por ello, en base a este proyecto se plantea su aprovechamiento con el fin de mitigar el impacto ambiental y contribuir al desarrollo económico y social. (Rafael, 2022)

Teniendo como objetivo diseñar una planta piloto para la fabricación de ladrillos, elemento clave y fundamental en la industria de la construcción. Mediante estudios realizados anteriormente con los cuales se busca obtener la resistencia a la compresión y absorción de humedad según la Norma Técnica Colombiana NTC 4205. (Hernández, Villegas, Castaño, Mauricio, & Paredes, 2006)

2.1 Caracterización de los lodos de potabilización del agua

Los lodos es un material que se puede caracterizar tanto físicamente como químicamente, teniendo en cuenta propiedades como: textura, resistencia mecánica, densidad, PH, porosidad, humedad y plasticidad. (Alvarado, 2024) (Mora, 2011)

ya que la cantidad de aluminio presente en este depende de: el arrastre de sedimentos de la fuente de agua y de la cantidad de coagulante utilizado (Hernández, Villegas, Castaño, Mauricio, & Paredes, 2006).

En estudios recientes (Medina & Arteaga, 2022), emplearon métodos estandarizados para determinar la cantidad de aluminio presente en los lodos, además de sólidos totales y volátiles. Donde se reportó un contenido de aluminio superior a 32,000 mg/kg, valor que excede ampliamente los límites permisibles en cuerpos de agua, especialmente en ambientes ácidos (pH < 6.5). Asimismo, se observaron características físicas gelatinosas, viscosas y una combinación de materia orgánica e inorgánica en su estructura coloidal.

Se realizaron pruebas: Difracción de rayos X DRX en la cual se determina la estructura tridimensional de sustancias, en la cual los rayos X se dirigen a la muestra analizándola interiormente (UAEM , 2024).

2.2 Pruebas de absorción

Esta consiste en realizar pruebas de Adsorción en agua ASTM teniendo en cuenta la norma técnica Colombiana NTC 4026, usada para determinar la absorción de agua en materiales de mampostería de concreto, bloques y ladrillos, garantizando su idoneidad en aplicaciones estructurales. ((ICONTEC) I. C., 1997)

2.3 Prueba de compresión

En esta se han evaluado el cumplimiento de las normas ICONTEC tales como NTC 4017 para muestreo y ensayo de unidades de mampostería y otros productos de arcilla, incluyendo ladrillos ((ICONTEC) I. t., 2005) y NTC 4205 la cual especifica las propiedades físicas que deben cumplir las unidades de mampostería de arcilla cocida, como ladrillos y bloques cerámicos, incluyendo la resistencia mínima al a compresión ((ICONTEC) I. C., 2000), la cual consiste en la mezcla del lodo, arena y cemento y la compresión con la prensa hidráulica para determinar la resistencia a la compresión de los ladrillos durante periodos de tiempo establecidos.

En estudios previos (Medina & Arteaga, 2022), aunque no se fabricaron ladrillos directamente, sí se evaluó la posibilidad de recuperar el sulfato de aluminio contenido en los lodos y reutilizarlo como coagulante, lo que representa una solución ambiental y económica complementaria a su uso en materiales de construcción.

2.4 Proceso de elaboración de ladrillo de la mezcla que incluye lodo de potabilización de agua

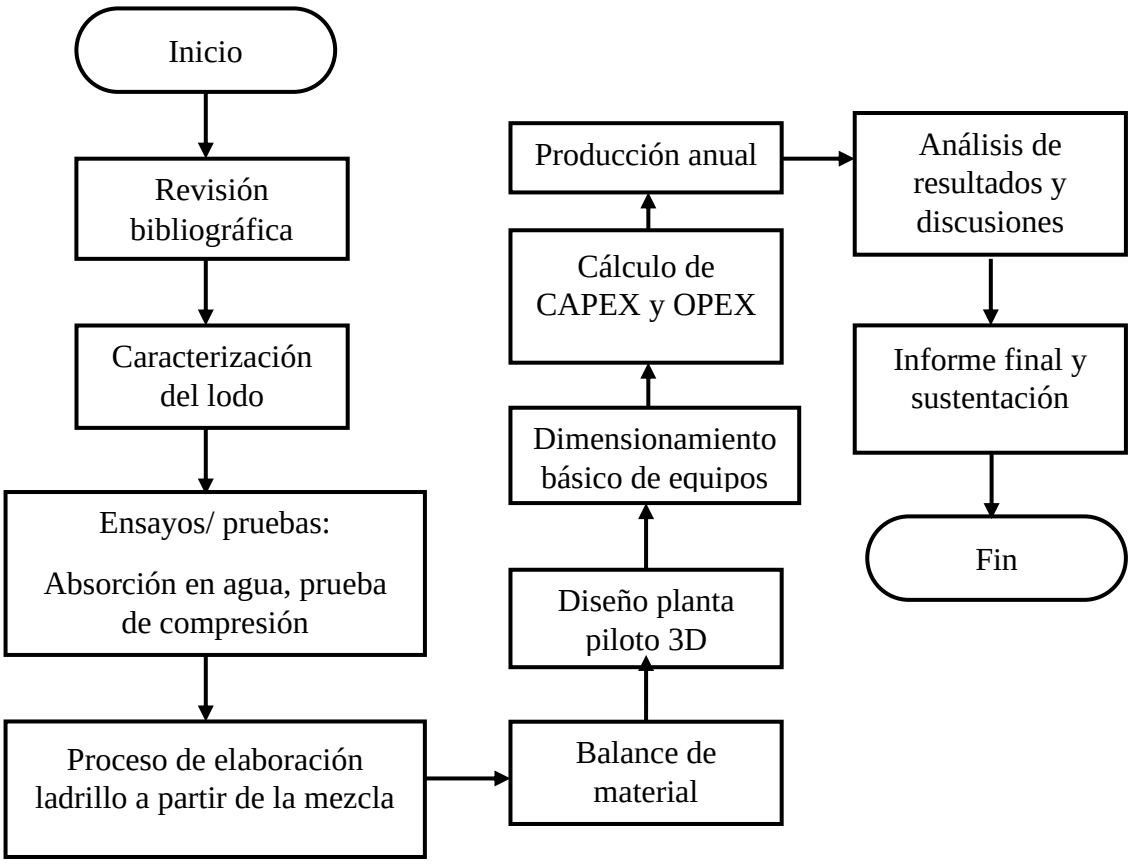
Estudios anteriores en los cuales se ha realizo muestras de ladrillos a partir del lodo no se ha llegado a la resistencia necesaria que cumpla con la norma técnica colombiana, pero se han obtenidos materiales aptos para la mampostería, los procesos de elaboración están determinados mediante ciertos procedimientos tales como: secado, molienda, tamizado, paletización, mezcla, molde y secado a la intemperie. (Hernández, Villegas, Castaño, Mauricio, & Paredes, 2006) (Cesar Pardo, 2022) (Alvarado, 2024).

Además, investigaciones recientes proponen también el tratamiento previo de los lodos mediante acidificación, para reducir su contenido de metales pesados y aumentar su viabilidad como materia prima. Por ejemplo, el procedimiento aplicado por Castro y Reyes (2022) incluyó la acidificación con H_2SO_4 al 25%, agitación durante 30 minutos a 100 rpm y ajuste del pH a 1.5. Este tratamiento permitió separar el sulfato de aluminio del lodo, generando un subproducto útil como coagulante.

3. Metodología

Figura 1

Flujograma proceso experimental



El presente trabajo se realizó siguiendo una metodología que se detalla a continuación:

3.1 Revisión Bibliográfica:

Se llevó a cabo una revisión exhaustiva de literatura existente, usando fuentes especializadas como lo son artículos científicos, libros y la base de datos de la Universidad Industrial de Santander. El objetivo fue contextualizar el marco teórico actualizado del tema.

3.2 Recolección de Muestras:

Se recolectaron lodos sedimentados provenientes del acueducto metropolitano de Bucaramanga. Las muestras fueron obtenidas de forma aleatoria y sometidas a un proceso preliminar antes de su uso como materia prima.

3.3 Caracterización del lodo:

3.3.1 DRX

Las muestras fueron sometidas a procesos de caracterización fisicoquímica. La caracterización química se realizó por difracción de rayos X (DRX) para identificar y cuantificar la composición elemental realizada en el laboratorio de rayos X del perteneciente grupo de investigación GIMAT de la Universidad Industrial de Santander, mientras la caracterización física incluyó la determinación de la granulometría según ASTM D 422-63, la cual determina la distribución del tamaño de las partículas en suelos mediante tamizado. El método se basa en la separación de partículas por tamaño usando una serie de tamices estándar y el cálculo de los porcentajes de masa retenida en cada matiz.

3.3.2 Granulometría

La granulometría es una herramienta fundamental en múltiples disciplinas científicas y de ingeniería. En la cual permite la selección de tamaño de partícula y distribución que componen la muestra, brindando información sobre sus propiedades físicas y su comportamiento en diferentes aplicaciones. Dado esto permite explorar la granulometría de una muestra para analizar la distribución de partículas de diferentes tamaños de partícula, lo cual influye directamente en propiedades como la compactibilidad, permeabilidad, resistencia y otros factores importantes. Este análisis es esencial para la optimizar procesos industriales, mejorar la calidad del suelo, diseñar

mezclas de concreto y evaluar la idoneidad de materiales para diversas aplicaciones técnicas y científicas.

Esta consistió en llevar el lodo después del secado a una serie de 7 tamices durante 14 minutos 2 minutos por malla, para observar el porcentaje de solido retenido en cada malla usada las cuales fueron la N° 10, 30, 50, 70, 100, 140 y 200.

3.4 Prueba de absorción en agua

Teniendo las mezcla la cual consto en la realización de tres diferentes mezclas en las cuales se varió el porcentaje de lodo y arena, el cual vario en un 10, 50 y 90 % manteniendo fijo la composición del 25 % cemento y aplicando una presión de compactación de 10.000 a 16.000 libras (**Figura 2**) para cada muestra de ladrillos de 60 g, se procede al secado a temperatura ambiente y en estufa a 80 °C durante dos días, posteriormente se registra el peso de cada muestra, luego se llevan a hervir durante dos horas (**Figura 3**), dejando enfriar y se procede a tomar los datos de peso suspendido (**Figura 4**) el cual es la inmersión en agua de la muestra y seguido se seca con un paño (**Figura 5**) y obteniendo el peso saturado (**Figura 6**).

Figura 2

Presión de compacto

Figura 3

Cocción de muestras durante dos horas

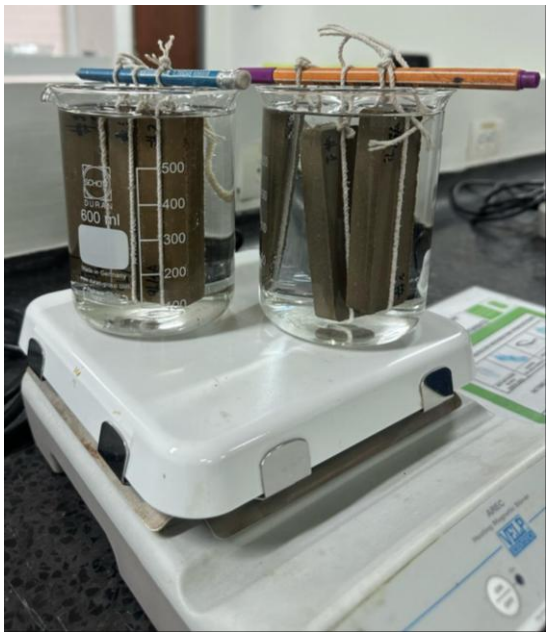


Figura 4

Peso sumergido

Figura 5

Secado de muestra

Figura 6

Peso saturado

3.5 Prueba de compresión de material de ladrillo basado en NORMA ICONTEC

Los ensayos de compresión se llevaron a cabo en el Laboratorio de materiales de la Universidad Industrial de Santander, especímenes preparados según normas correspondientes con diferentes mezclas que fueron sometidos a 28 días de curado.

Se evaluaron el cumplimiento de la norma técnica NTC 4026 (ICONTEC-NTC4026, 1997) para ladrillos estructurales y NTC 4076 para ladrillos no estructurales. La evaluación de la resistencia mínima exigida se puede observar (**Tabla 1**, **Tabla 2**). Para prueba de ensayo a 6 cubos, siguiendo las proporciones establecidas por la NTC 220 con la cual se realizó la mezcla de los especímenes (arena, lodo, cemento y agua), pasando por los morteros a 4 capas de 8 golpes por

cada una (**Figura 8**), se compactaron y se sumergieron en agua para una edad de ensayo donde se rompieron dentro de la tolerancia permisible de 7, 14, 21 y 28 días (ICONTEC, 2024).

Tabla 1

Resistencia a la compresión: Norma NTC 4026

Resistencia a la compresión a los 28 d (RC_{28})[B], evaluada sobre el área neta promedia (Anp)			**RAbsorción de agua (Aa) % según el peso (densidad) del concreto secado en horno, kg/m3**		
Mínimo, Mpa			**Promedio de 3 unidades, máximo, %**		
Clase	**Promedio 3 unds**	**Individual**	**Peso liviano, menos de 1680 kg/m3**	**Peso mediano, de 1680 kg/m3 hasta 2000 kg/m3**	**Peso normal, 2000 kg/m3 o más**
Alta	13	11	15 %	12 %	9 %
Baja	8	7	18 %	15 %	12 %

Nota.Norma4026, (ICONTEC-NTC4026, 1997)

Tabla 2

Resistencia a la compresión: Norma NTC 4076

Resistencia a la compresión a los 28 d (RC28)[A], evaluada sobre el área neta promedia (Anp)Mínimo, MPa	
Promedio de 3 unidades	**Individual**
6	5

A La resistencia a la compresión se ha especificado a los 28 d. Sin embargo, las unidades se pueden utilizar a edades más tempranas, cuando exista un historial sobre la evolución de la resistencia de unidades de iguales características, y éste indique que las primeras alcanzan dicha resistencia. Esto no exime de la verificación directa de la calidad de las unidades.

*Nota.*Norma4076, (ICONTEC-NTC4076, 2017)

Figura 7

Mezcla

Figura 8

Llenado de moldes

Figura 9

Resistencia a la compresión 7 días de 50% reemplazo agregado

Resistencia a la compresión para 14 días **Apéndice A**y muestra después del rompimiento de la compresión **Apéndice B**.

3.6 Proceso de elaboración de ladrillo a partir de mezcla que incluye lodo

3.6.1 Secado del lodo

Se lleva el lodo recogido de la AMB a un secado al horno.

3.6.2 Trituración y molienda

Seguido del secado del lodo, se lleva a un proceso de trituración el cual se realizó por medio de un molido de bolas de una cantidad de 23 de similar diámetro aproximadamente de 4 cm durante 30 minutos, en el cual se tuvo la precaución de un buen sellado por seguridad de ejecución.

Figura 10

Trituración molino de bolas

Figura 11

Extracción del lodo molido

3.6.3 Tamizado

Seguido de la molienda se realizó un tamizado en la malla #50

3.6.4 Peletización

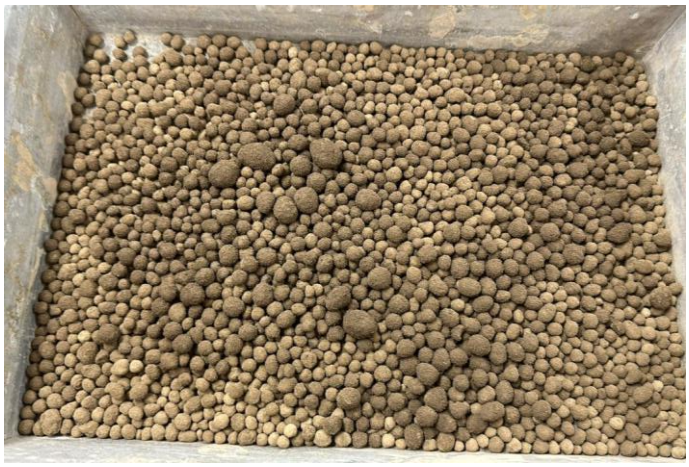
En esta etapa se usó un peletizador, equipo el cual convierte materiales en pequeñas esferas llamadas pellets, con el fin de encapsular los metales pesados y así mismo reducir su área superficial expuesta al ambiente, donde se agregó de forma gradual el material (lodo) previamente tamizado y agregando agua como coagulante que facilitó la formación de los pellets, el equipo trabajó con una inclinación de 134°, obteniendo pellets aproximadamente de 4-6 mm de diámetro, los cuales fueron secados y almacenados posteriormente.

Figura 12

Peletización

Figura 13

Pellets 4-6mm



3.6.5 Mezcla

En esta etapa se realizaron las diversas mezclas como lo fue la de absorción en agua para especímenes de 60 gramos cada uno, 3 por muestra variando el porcentaje en 90, 50 y 10 de pellets con respecto a la arena y manteniendo fijo el del cemento con un porcentaje de 25% del peso por espécimen (**Figura 14**).

En el caso de prueba a la resistencia de la compresión se realizó por una mezcla establecida por la NTC 220, en el cual el 50% de arena fue reemplazado por los pellets, y manteniendo los demás valores constantes respecto a la norma (cemento y agua) (**Figura 14**).

Figura 14

Mezcla de prueba de absorción

Figura 15

Mezcla de prueba resistencia a la compresión

Fuente: Autor

3.6.6 Moldeo

En esta etapa después de cada mezcla realizada con los diferentes porcentajes establecidos, se procedió a moldear para los especímenes de 60 g manualmente, con golpes y retirando exceso de mezcla y en los morteros de 5x5 cm mediante apisonamiento manual mediante cuatro capas con 8 golpes continuos por cada capa, además de igual forma retirando exceso de mezcla (ICONTEC, 2024).

Figura 16

Moldeo de morteros

3.6.7 Secado

Este secado se llevó a cabo para los especímenes por un día, seguido de la inmersión en agua **Apéndice C**, **Apéndice C** para posteriormente realizar prueba de compresión durante los siguientes 7, 14, 21 y 28 días. En la prueba de absorción en agua durante un día a temperatura ambiente, continuando con dos días de secado en estufa a 80°C.

4 Resultados

4.1 Caracterización de lodos del proceso de potabilización de la planta Bosconia del AMB

Los aspectos físicos y químicos de los lodos dependen siempre de una planta a otra, de la calidad del agua cruda, de las estaciones del año y, principalmente, del tratamiento aplicado; sin embargo, presentan características similares. A partir del uso de sulfato de aluminio, se genera un lodo con apariencia gelatinosa y color marrón, conformado en su mayoría por agua, hidróxido de aluminio, coloides, partículas inorgánicas, residuos de productos químicos utilizados en el proceso y materia orgánica. Es indispensable conocer las propiedades del lodo que se va a tratar, para así determinar el tratamiento a aplicar y evaluar la posible recuperación del coagulante. Entre los principales aspectos que se analizan para caracterizar los lodos se encuentran:

- pH
- Turbiedad
- Alcalinidad
- Densidad o gravedad específica
- Rangos de dosis de coagulantes utilizados
- Sólidos totales en suspensión
- Aluminio residual
- Sulfatos
- Hierro total

En el caso de los lodos de la filtración del proceso de potabilización de la planta Bosconia, por las características del río Suratá que recibe descargas de procesos mineros tiene metales pesados tal como se muestra en la tabla 1, donde se aprecia que la concentración de zinc (5468 mg/kg) no cumple con las normas USEPA 30508:1996 y USEPA 7008:2007.

Tabla 3

Composición química y propiedades físicas de los lodos de filtración del proceso de potabilización de la planta Bosconia AMB

Parámetro	Resultado	Unidad	Observación
Cadmio (A)	6,01	mg Cd/kg	Si cumple
Cobre (A)	419,0	mg Cu/kg	Si cumple
Cromo (A)	51,6	mg Cr/kg	Si cumple
Molibdeno (A)	<17,7	mg Mo/kg	Si cumple
Níquel (A)	39,0	mg Ni/kg	Si cumple
Plomo (A)	194,0	mg Pb/kg	Si cumple
Zinc (A)	**5468,0**	**mg Zn/kg**	**No cumple USEPA 3050B:1996; USEPA 7000B:2007**
Mercurio (A)	4,7	mg Hg/kg	Si cumple
Humedad	10,8	%	No aplica
pH (A)	6,88	Unidad de pH	No aplica
Aluminio suelos	<4,6	meq Al/100g	No aplica
Plata (A)	9,08	mg Ag/kg	No aplica
Hierro (A)	84658	mg Fe/kg	No aplica

Fuente: Laboratorio BIOPOLAB www.biopolab.com mayo de 2024.

4.1.1 Granulometría

La siguiente tabla se realizó bajo norma ASTM D422, al analizar los resultados de **Tabla 4**, se puede apreciar que el lodo analizado presenta una granulometría dominada por partículas gruesas (mayores a 600 micras), lo que indica que fue bien deshidratado y posiblemente contiene restos arenosos del proceso de sedimentación. Además, esto indica que este lodo es muy útil, como agregado en materiales de construcción, pero requiere de ajustes en la mezcla para el uso de productos como ladrillos, debidos a su baja cantidad de finos

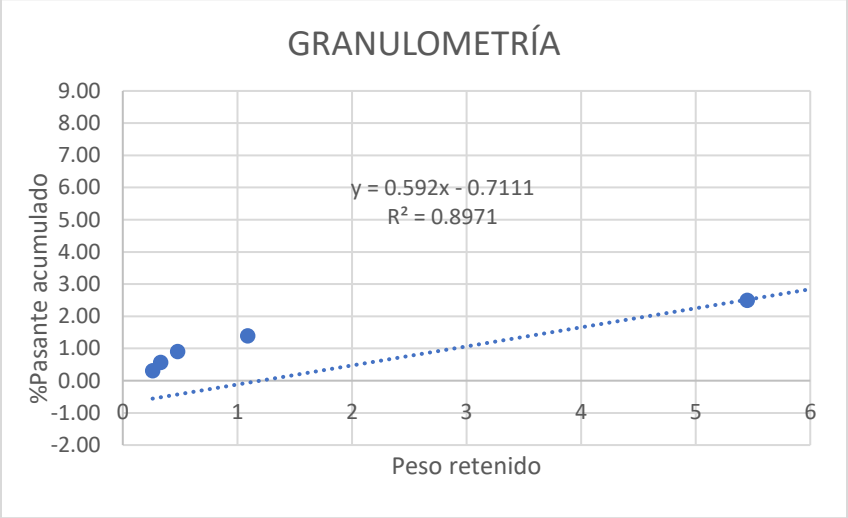
Tabla 4

Granulometría

TAMIZ	TAMIZ (Micras)	PESO RETENIDO (g)	%RETENIDO	%RETENIDO ACUMULADO	%PASANTE ACUMULADO
10	2000	59.6	60.34	60.34	39.66
30	600	31.27	31.66	91.99	8.01
50	300	5.45	5.52	97.51	2.49
70	212	1.09	1.10	98.61	1.39
100	150	0.48	0.49	99.10	0.90
140	106	0.33	0.33	99.43	0.57
200	75	0.26	0.26	99.70	0.30
FONDO		0.3	0.30	100.00	0.00
TOTAL		98.78	100		

Figura 17

Granulometría

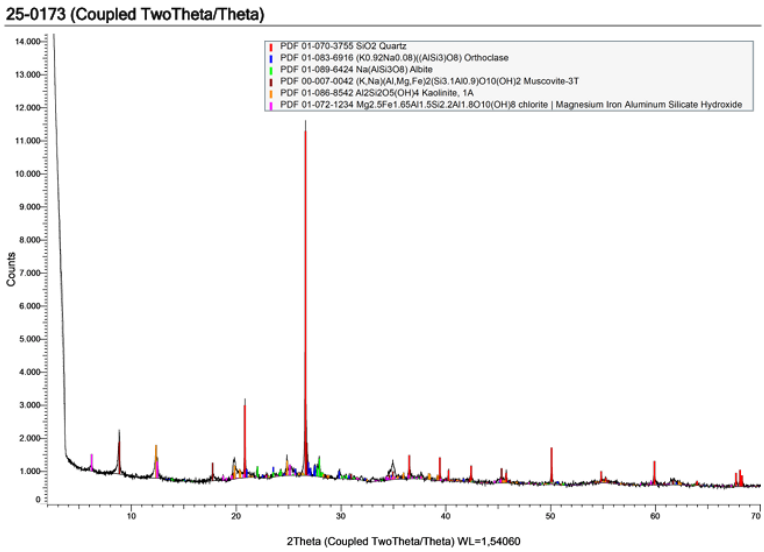


Contendido fino y grueso vs % pasante acumulado **Apéndice D**

DRX

Figura 18

Difracción de rayos X



Sílice (SiO2): La presencia de picos cristalinos de cuarzo indica que la sílice está presente en forma de cristales bien definidos en la muestra analizada.

Aluminosilicatos de hierro: Los picos observados sugieren la existencia de fases cristalinas que contienen aluminio, hierro y silicio en su estructura, típicas de aluminosilicatos de hierro, como augita, hedenbergita, almandino u otras posibles variantes. como cuarzo, ortoclase, albita, moscovita, caolinita y clorita, lo cual indica que tiene características similares a las arcillas naturales, permitiendo su reutilización en materiales de construcción, como ladrillos o bloques.

4.1.2 Caracterización microscópica y SEM

Esta se efectuó con la finalidad de conocer la liberación de las partículas solida presentes que se encuentran en funcion tanto de la probabilidad de ruptura como del tamaño al que se fracciona. El análisis realizado, consistió en realizar la separación de las partículas sólidas a distintos tamaños de malla, empezando en la #100 hasta la #325. En las imágenes se puedes apreciar el material retenido en cada malla, lo cual nos da una idea visual de cómo cambia la textura y forma de las partículas a medida que se vuelven más finas.

Figura 19

Imágenes de estereoscopía para determinar liberación de partículas sólidas en el lodo

Malla 100 - 1

Malla 200 - 1

Malla 325 - 1

Malla 325 – 2

Nota. Laboratorio beneficio de minerales
Universidad Industrial de Santander

4.2 Pruebas

4.2.1 Absorción en agua

Inicialmente las probetas se llevaron a ensayo de absorción en agua, en las **Tabla 5**, **6**, **7** y **8**, se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 5

Muestra antes de inmersión

Muestra antes de inmersión pesos en [g]			
#muestra	**90% Lodo**	**50% Lodo**	**10% Lodo**
1	45.717	51.679	56.775
2	51.742	51.64	63.521
3	46.337	51.45	54.95
prom	47.93	51.59	58.42

Tabla 6

Peso suspendido

Peso suspendido[g]			
#muestra	**90% Lodo**	**50% Lodo**	**10% Lodo**
1	28.017	31.48	34.591
2	31.647	31.489	38.681
3	28.375	31.396	33.306
prom	29.35	31.46	35.53

Tabla 7

Peso saturado

Peso saturado [g]			
#muestra	**90% Lodo**	**50% Lodo**	**10% Lodo**
1	56.151	60.343	62.937
2	64.279	60.356	70.21
3	58.063	60.22	60.538
prom	59.50	60.31	64.56

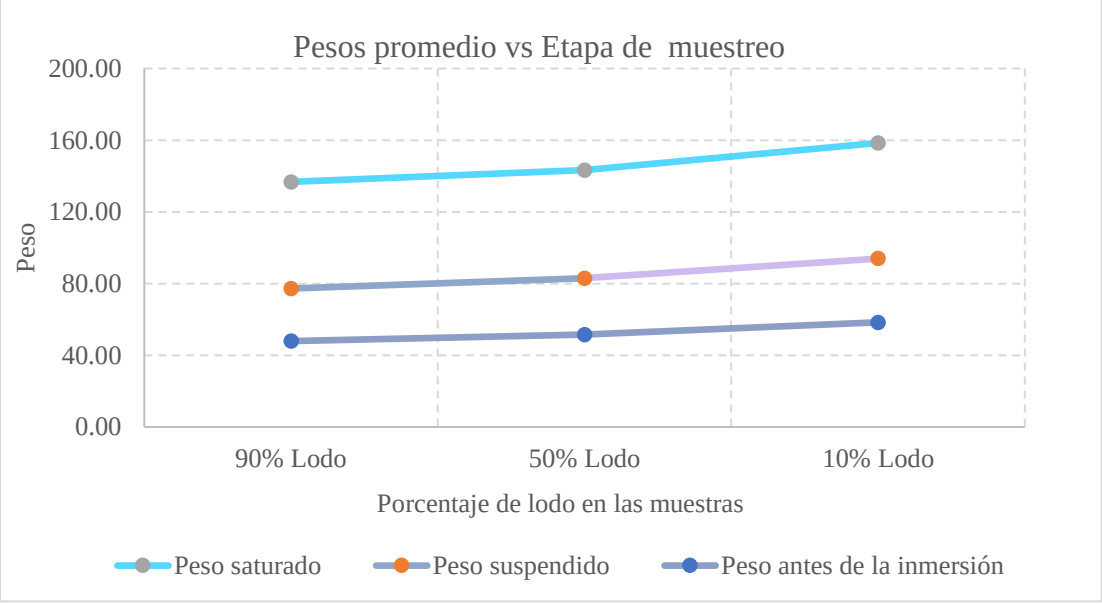
Tabla 8

Promedio de los pesos

Designación	**90% Lodo**	**50% Lodo**	**10% Lodo**
Peso antes de la inmersión	47.93	51.59	58.42
Peso suspendido	29.35	31.46	35.53
Peso saturado	59.50	60.31	64.56
%Absorción	24.13	16.90	10.52

Figura 20

Pesos promedios muestra vs etapa de muestreo de proporción de especímenes como sustituto de arena fina



El porcentaje de absorción de agua se determina mediante la siguiente formula

$$\%Absorción = \frac{100x(W_{ss} - W_s)}{W_s}$$

Donde:

$$W_s = masa\ seca\ del\ espécimen\ antes\ de\ inmersión, en\ g.$$

$$W_{ss} = masa\ sumergida\ en\ agua\ del\ espécimen\ saturado\ luego\ de\ inmersión\ en\ agua\ fría, en\ g$$

Al revisar los resultados se evidencia que a mayor porcentaje de lodo presente en las probetas mayor va a ser su nivel de absorción. Este comportamiento indica que el lodo incrementa la porosidad del material, lo cual podría afectar negativamente su resistencia y durabilidad. Por tanto, aunque es viable reutilizar lodos en la fabricación de materiales de construcción, su proporción debe ser controlada para garantizar un buen desempeño estructural.

4.2.2 Prueba de compresión

Una vez transcurridos los 28 días de curado, las probetas se secaron superficialmente con tela y se llevaron al ensayo de la compresión. En la **Tabla 9** se muestran los resultados obtenidos del ensayo.

Tabla 9

Prueba de resistencia a la compresión

Tiempo sumersión [días]	**Peso [g]**	**Resistencia [kN]**	**Resistencia [MPa]**
7	233.29	1.45	0.58
14	230	1.5	0.6
21	242	1.7	0.68
28	240	1.4	0.56

Apreciando los resultados, para las muestras de las muestras de los ladrillos, para la mezcla de 50% no cumple con la resistencia mínima a la compresión, debido a que la resistencia mínima promedio para ladrillos estructurales debe ser de 8 MPa e individual de 7 MPa y para ladrillos no estructurales esta debe ser de 3,5 MPa.

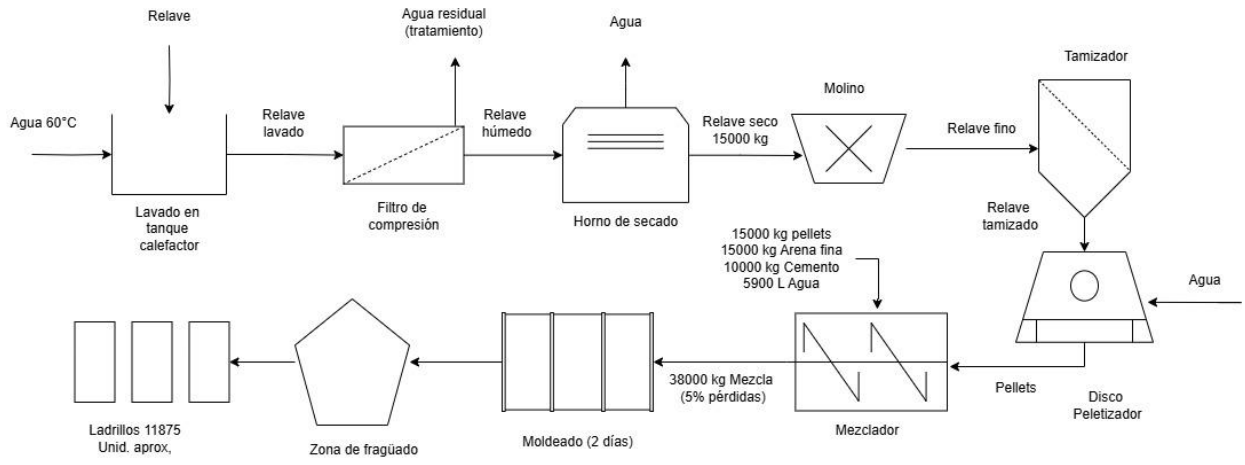
4.3 Balance de material

Luego de realizar las pruebas preliminares, se efectúo la conformación del material ladrillo empleando el porcentaje de lodo (50%) que sustituye el 50% de arena fina en la mezcla necesaria.

Los ensayos mecánicos y de hidratación, así como las pruebas de calidad ambiental y de durabilidad nos permiten proponer el flujograma mostrado en la **Figura 21**, donde se exponen los equipos principales y equipos auxiliares con los cuales se plantea una planta piloto (plano y esquema 3D)

Figura 21

Flujograma y balance de materia prima para 15 toneladas



Como se observa en la **Figura 21**, Para el balance general se realizó a nivel laboratorio, llevándolo a nivel industrial teniendo en cuenta que se usaran 15 toneladas de pellets, en igual proporción la arena y conservando por NTC el 25% de cemento el cual es de 10 toneladas, para una cantidad total de mezcla de 40 toneladas y teniendo en cuenta 5% de pérdidas para así obtener 38 ton de mezcla, y una cantidad de 11875 ladrillos por día con dimensiones de 20x10x8 cm y un peso aproximado de 3.2 kg por día.

4.4 Dimensionamiento de equipos

El dimensionamiento de equipos es de gran importancia para obtener una óptima eficiencia de la planta, a continuación, en la **Tabla 10**, se dimensionan los equipos principales:

Tabla 10

Dimensionamiento de equipos

Equipo	**Potencia(kW)**	**Costo mensual de operación (USD)**	**Capacidad**	**Eficiencia estimada (%)**	**CAPEX instalado (USD)**
Tanque calefactor	15	300	15 m^3	80	10500
Filtro de compresión	10	200	15 ton	85	12250
Horno de secado	60	1200	1.9 ton/h	60	14000
Molino	25	500	3.8 ton/h	65	7000
Tamizadora banda	5	150	1.9 ton/h	90	15000
peletizador	15	300	45 ton/ciclo	85	5500
Mezclador	12	250	7.5 ton/ciclo	85	11100
Moldeadora de ladrillos	18	400	3,000 ladrillos/h	80	11000
Zona de fraguado		100	11,875 ladrillos/lote	70	3000
	Subtotal	3400			89350

4.5 Evaluación económica de fabricación de ladrillos macizos a partir de lodos de potabilización de agua

Tomando una base de producción de 1000 ladrillos, se calculó el valor por unidad de ladrillo, teniendo en cuenta el valor de los diferentes agregados tomando como referencia los precios de estos en el almacén HOMECENTER de la empresa SODIMAC. Además, se tomó como referencia el precio por unidad de un ladrillo macizo para realizar la comparación. Las tablas siguientes dan los datos más relevantes.

Tabla 11

Dimensión y costo unidad de ladrillo fabricado a través de relaves

Ladrillo fabricado a partir de mezclas que incluye lodos	Medida(cm)	Densidad mezcla (kg/m^3)	Volumen (m^3)	Masa (kg)	Precio (COP)
	20x10x8	1998.77	0.0016	3.197	896.91

Comparado con un ladrillo macizo de las mismas dimensiones (20x10x8), tiene un valor de $1.300 COP en HOMECENTER. (HOMECENTER, 2024).

Como se observa, hay una diferencia de $403,09 COP por unidad de ladrillo, esto equivale al ahorro en materiales por cada ladrillo fabricado a partir de lodos. Ahora bien, como se aclaró anteriormente este ahorro es equivalente utilizando el precio de los diferentes agregados desde HOMECENTER, es por esto, se contactaron dos proveedores departamentales diferentes de arena los cuales venden la arena a menor precio. Un kilogramo de arena lavada en HOMECENTER tiene un precio aproximado de 248 COP, mientras que el proveedor nos da un precio de 38 COP por

kilogramo de arena. Como se observa, esto disminuiría el costo unitario del ladrillo fabricado, y aumentaría el ahorro por cada unidad.

4.5.1 Monto de inversión y costo de la planta

Tabla 12

Inversiones fijas

RUBRO	DOLARES (US)
Equipos principales	89350
Equipos auxiliares	10722 (12% equipos)
Infraestructura (Obras civiles)	7690
Energía	7148 (8% equipos)
Terrenos	13403 (15% equipos)
Organización	3468 (5% equipos)
Imprevistos	8935(10% equipos)
Total	140716

Nota. Prof. Walter Pardavé, Diseñador de plantas de beneficio de minerales

Tabla 13

Capital de trabajo

RUBRO	DOLARES (US)
Suministros	18780
Insumos	11130
Imprevistos	3320
Total	33230

Tabla 14

Ingresos percibidos

Rubro	
Ladrillos/año	4.275.000
U$/año (ganancia neta)	430.802,44

4.5.2 Análisis económico básico

El objetivo del análisis económico es saber cuánto dinero puede llegar a ahorrarse utilizando un lodo a cambio de arena fina o cemento. Como se observa en la **Figura 21**, el proceso de obtención de ladrillos parte de 15 toneladas de lodo. Suponiendo que la empresa trabaja 50 semanas (350 días) al año, pues la planta debe tomar tiempo para cualquier tipo de mantenimiento, y, además, teniendo presente los datos de la **Tabla 15**.

Tabla 15

Información para el análisis económico

Precio ladrillo Homecenter	1.300 COP
Precio ladrillo fabricado con lodo	896,91 COP
Ahorro por ladrillo	403,09 COP
Ladrillos fabricados por año	4.275.000unidades
Precio del dólar en COP	4.000 COP

Se realiza el siguiente cálculo:

$$\frac{403{,}09\ COP}{1\ ladrillo} * \frac{x}{4.275.000\ ladrillos}$$

$$x = 1.723.209.750\ COP = 430.802{,}44\ US$$

Es decir, la planta se ahorra 430.802,44 dólares al año. Ahora bien, es claro que la planta debe invertir en gastos anuales como manteamiento de equipos, personal, infraestructura, etc.

(sección 4.3.1), siendo un valor de 173.946 US. Entonces se concluye que la planta tiene un gran beneficio no solo ambiental al usar lodo de potabilización de agua, sino que sus ahorros anuales pueden saldar rápidamente la inversión inicial de la planta (Aprox. 6 meses).

4.4 Diseño 3D de la Planta Piloto

Para el diseño de la planta piloto se usó el software ArchiCAD con el procedimiento del laboratorio y el balance de materiales obtenido anteriormente. (Ver **Figura 22**,**Figura 23** y **Figura 24**)

Se puede observar una mejor visualización en el **Apéndice E**

Figura 22

Vista frontal planta 3D

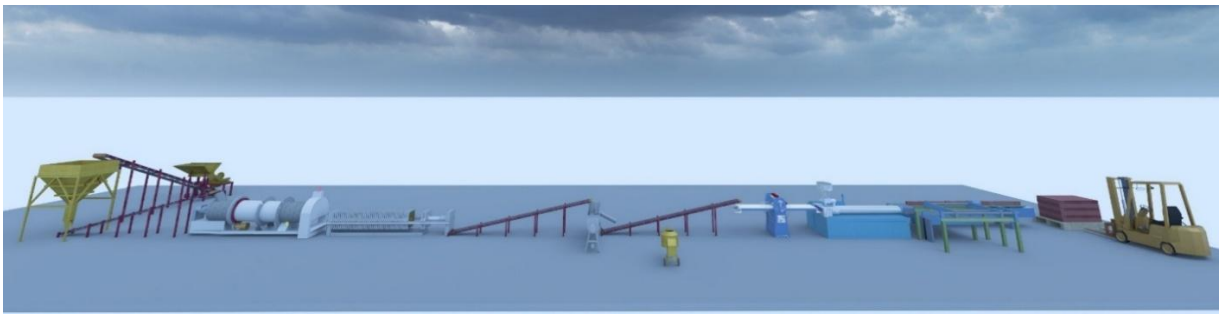


Figura 23

Vista panorámica planta 3D

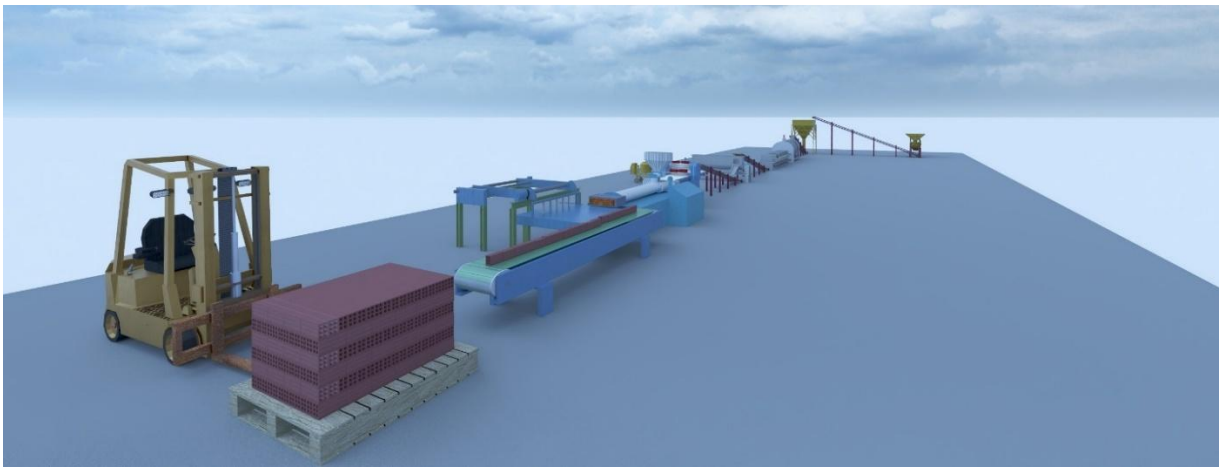
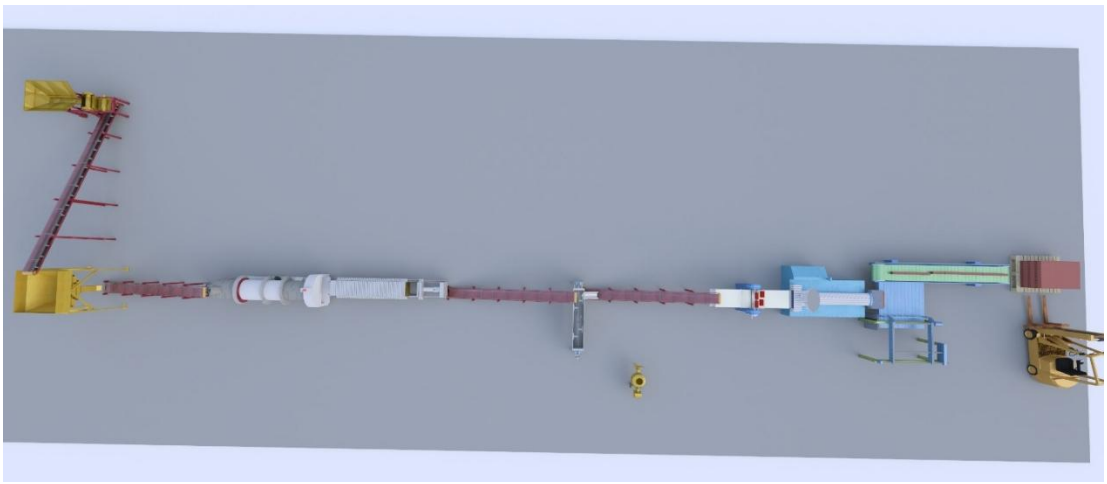


Figura 24

Vista superior planta 3D



5 Conclusiones

- Los resultados de las pruebas realizadas para fabricación de ladrillos no cumplieron con la resistencia mínima para ladrillos estructurales, por ende, se usarán como material de construcción no estructural.
- La mezcla adecuada es de: 37.5 % Pellets, 37.5 % arena fina, 25% cemento y agua necesaria.
- El valor de cada ladrillo obtenido es de 896,91 COP, respecto al valor comercial actual de 1300 COP de un ladrillo con las mismas dimensiones. Daría un ahorro de 403,09 COP por ladrillo fabricado, lo cual, con un total de 4.275.00 ladrillos producidos en un año, nos da un retorno de inversión en unos meses.
- La planta piloto para la obtención de ladrillos requiere una inversión de $173.946 dólares.
- Es viable técnicamente, ambiental, económica y socialmente, obtener ladrillos no estructurales con lodos de potabilización de aguas, siendo factible para la economía circular y desarrollo de aprovechamiento de material usualmente desechado.

6 Recomendaciones

- Para investigaciones futuras, se recomienda la realización de más ensayos mecánicos como de compresión, variando los parámetros para cumplimientos de NTC.
- Se sugiere hacer material de construcción estructural con insumos adicionales en la mezcla para incrementar la resistencia a la compresión.
- Se recomienda realizar un estudio de toxicidad del material para confirmar el mínimo riesgo en su posible uso.

Referencias

(ICONTEC), I. C. (1997). *INGENIERÍA CIVIL Y ARQUITECTURA. UNIDADES (BLOQUES Y LADRILLOS) DE CONCRETO, PARA MAMPOSTERÍA ESTRUCTURAL NTC4026.* Bogotá: icontec internacional.

(ICONTEC), I. C. (2000). *Unidades me mampostería de arcilla cocida. Ladrillos y bloques cerámicos NTC 4205.* Bogotá: ICONTEC.

(ICONTEC), I. t. (2005). *Norma Técnica Colombiana NTC 4017.* Bogotá: ICONTEC.

Alvarado, A. F. (2024). *Obtención del material de construcción a partir de lodos de plantas industriales de potabilización de aguas.* Bucaramanga.

Cesar Pardo, M. S. (2022). *Obtención de productos a partir de relaves de flotación de minerales polimetálicos.* Bucaramanga: Universidad Nacional mayor de San Marcos.

Dirección de asuntos ambientales, s. y. (2021). Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible. *Sector alfarero y de producción de ladrillo en Colombia*, 28.

Hernández, D., Villegas, J. D., Castaño, Mauricio, J., & Paredes, D. (2006). Aprovechamiento de lodos aluminosos generados en sistemas de potabilización, mediante su incorporación como agregado en materiales de construcción. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín, vol.56,* 15.

ICONTEC, N. 2. (25 de 09 de 2024). *ICONTEC.* Obtenido de https://ecollection-icontec-org.bibliotecavirtual.uis.edu.co/pdfview/viewer.aspx?locale=en-US&Q=9DA69D00EF466C2D787E0D6BE7F29A881FA6E8D7D5D19C52&Req=

ICONTEC-NTC4026. (1997). *ICONTEC*. Obtenido de BIBLIOTECA UIS: https://ecollection-icontec-org.bibliotecavirtual.uis.edu.co/normavw.aspx?ID=3071

ICONTEC-NTC4076. (2017). *ICONTEC*. Obtenido de BIBLIOTECA UIS: https://ecollection-icontec-org.bibliotecavirtual.uis.edu.co/normavw.aspx?ID=3117

James Keeley, P. J. (1 de enero de 2016). *Coagulant recovery and reuse for drinking water treatment. Elsevier. Water Research.* Obtenido de https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043135415303031?via%3Dihub

Medina, C., & Arteaga, R. (2022). *RECUPERACIÓN DE SULFATO DE ALUMINIO A PARTIR DE LOS LODOS PRODUCIDOS EN LA PLANTA POTABILIZADORA HERMINIA CABELLO SÁNCHEZ.* Guayaquil - Ecuador: Universidad de Guayaquil.

Minh Duc, M. T. (22 de noviembre de 2022). *ScienceDirect*. Obtenido de Beneficial reuse of water treatment sludge in the context of circular economy. Elsevier. Environmental Technology & Innovation.: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352186422001997?via%3Dihub

Mora, F. E. (2011). *Utilización de los lodos generados en el proceso de potabilización de agua de la planta de trataiento "CASIGANA", como aditivo para suelos de cultivo.* Ambato-Ecuador: Universidad técnica de Ambato.

Quiroga, J. (5 de febrero de 2018). *Procesos de potabilización de agua en las planatas del amb*. Obtenido de https://www.amb.com.co/amb/conoce-amb/nuestros-procesos/procesos-operativos/proceso-de-potabilizacion/

R, W., & A., W. (2010). *saber UCV*. Obtenido de http://saber.ucv.ve/bitstream/10872/11609/1/TEG%20WALFRED%20WALDROPH.pdf

Rafael, P. A. (noviembre-diciembre de 2022). *Evaluation of the potential of coagulant recovered from WTP sludge for use in low and high turbidity water.* Obtenido de Eng. Sanit. Ambient.: https://doi.org/10.1590/S1413-415220220111

scai. (2024). Obtenido de https://www.scai.uma.es/areas/micr/sem/sem.html

Tarique Ahmad, K. A. (1 de noviembre de 2016). *Characterization of water treatment sludge and its reuse as coagulant. Elsevier. Journal of Environmental Management.* Obtenido de https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301479716305485?via%3Dihub

Torres, K. E. (20 de abril de 2023). *Estudio para la recuperación de sulfato de aluminio a partir de lodos generados en los floculadores y sedimentadores*. Obtenido de Iberoamerican Journal of Engineering & Technology Studies. Vol 3 N°1.: https://doi.org/10.56183/iberotecs.v3i1.601

UAEM . (2024). Obtenido de Centro de investigaciones Químicas CIQ: https://www.uaem.mx/organizacion-institucional/unidades-academicas/centros-de-investigacion/ciq/laboratorio-de-difraccion-de-rayos-x

Universidad de Burgos. (4 de Marzo de 2020). Obtenido de https://www.ubu.es/parque-cientifico-tecnologico/servicios-cientifico-tecnicos/rayos-x/fluorescencia-de-rayos-x-frx

Apéndice

Apéndice A

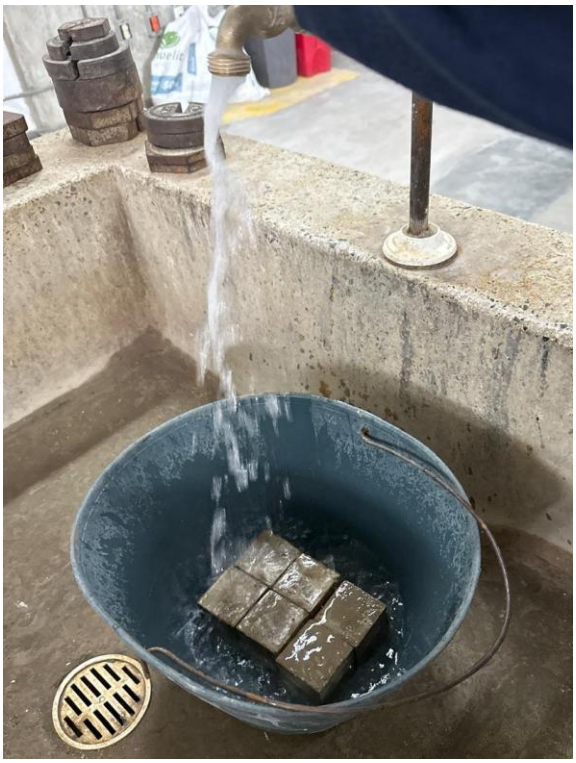
Resistencia a la compresión 14 días

Apéndice B

Muestra después de la compresión

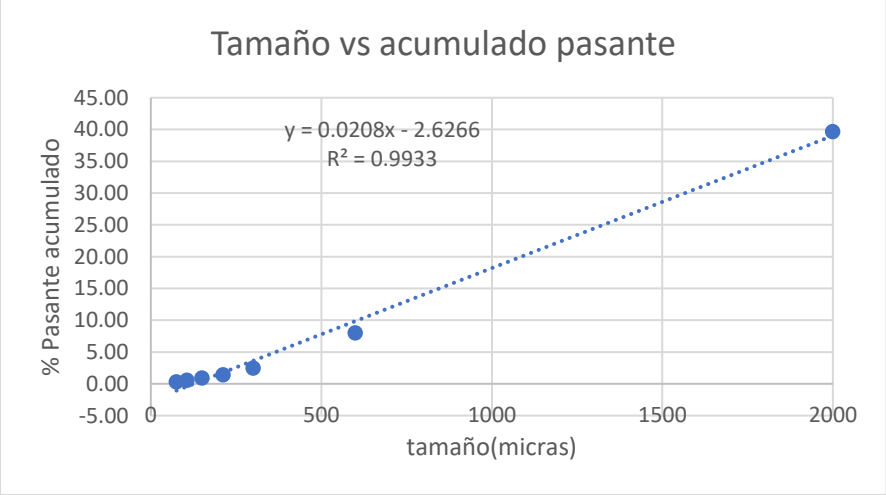
Apéndice C

Inmersión en agua 7, 14, 21 y 28 días



Apéndice D

Tamaño vs acumulado pasante



Apéndice E

Documento visualización planta 3D

Documento 1, este se puede observar vía online https://app.sketchup.com/app