

Metodología Para el uso de lodos provenientes de plantas de tratamiento de agua residual (PTAR) para la elaboración de bloques de concreto y su impacto en la economía circular. Casos de estudio.

**Presentado por:
Carlos Alberto Ararat Gómez**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:
Ingeniero civil**

**Director:
Juan Manuel González Guzmán**



Universidad Militar Nueva Granada

Facultad de Ingeniería

Programa de Ingeniería Civil

Bogotá D.C

Septiembre de 2023

Metodología Para el uso de lodos provenientes de plantas de tratamiento de agua residual (PTAR) para la elaboración de bloques de concreto y su impacto en la economía circular. Casos de estudio.

Presentado Por:
Carlos Alberto Ararat Gómez

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:
Ingeniero Civil

Director:
Juan Manuel González Guzmán



Universidad Militar Nueva Granada

Facultad de Ingeniería

Programa de Ingeniería Civil

Bogotá D.C

Septiembre de 2023

Tabla de Contenido

Glosario.....	1
Resumen.....	2
Abstract.....	3
Introducción	4
1. Problema	6
1.2. Identificación	6
1.2. Descripción	9
1.3. Planteamiento.....	10
2. Delimitación.....	11
3. Objetivos.....	12
3.1. Objetivo General.....	12
3.2. Objetivos Específicos.....	12
4. Antecedentes	13
5. Justificación	15
5.1. Gestión de Residuos.....	15
5.2. Innovación en la Construcción.....	16
5.3. Ambiental y Sostenibilidad.....	16
5.4. Económico y Eficiencia Empresarial.....	17
5.5. Contribución al Desarrollo Sostenible	17
6. Marco de Referencia	18
6.1. Marco Teórico.....	18
6.1.1. Gestión de residuos	18

6.1.2. Generalidad de los lodos residuales	19
6.1.3. Construcción sostenible	24
6.1.4. Mampostería	25
6.1.5 Concreto celular	26
6.1.6. Economía circular	29
6.2. Marco Legal y Normativo.....	30
6.2.1. Decreto 1287 de 2014	30
6.2.4. Resolución 0631 de 2015.....	31
6.2.5. NTC 4026.....	32
6.2.6. NTC 4076.....	34
6.2.7. Estrategia nacional de economía circular	35
7. Metodología	37
7.1. Tratamiento y Caracterización de los Biosólidos	39
7.2. Estudio de Diseño de Mezcla.....	40
7.3. Fabricación de Bloques.....	41
7.3.1. Preparación de materiales	41
7.3.2. Mezcla de los materiales	41
7.3.3. Modelo de bloques	42
7.3.4. Desmoldeo	42
7.3.5. Curado.....	42
7.3.6. Almacenamiento	42
7.4. Evaluación de Propiedades	43
7.4.1. Ensayo de resistencia a la compresión de bloques.....	43

7.4.2.	Ensayo de absorción	44
7.4.3.	Ensayo de densidad de masa seca.....	45
7.4.4.	Resultados esperados	45
7.5.	Análisis de Impacto en la Economía Circular.....	46
7.6.	Comunicación y Educación	48
8.	Conclusiones	50
9.	Recomendaciones	52
	Referencias.....	53

Lista de Figuras.

Figura 1. Tratamiento de aguas residuales..... 20

Figura 2. Procesamiento de biosólidos. 21

Lista de Tablas.

Tabla 1. DOFA.....	7
Tabla 2. Variables de caracterización de biosólidos para su uso.	22
Tabla 3. Producción de Biosólidos y frecuencia de análisis	23
Tabla 4. Dosis concretos celulares en gramos por mezclas y porcentajes.....	27
Tabla 5. Valores Máximos permisibles de categorización de biosólidos para su uso	30
Tabla 6. Requisitos de resistencia a la compresión, absorción y clasificación de peso...	33
Tabla 7. Requisitos para contenido de humedad en las unidades de mampostería tipo I.	35
Tabla 8. Dosificación Metodológica.....	40

Glosario

Biosólidos. Material con alto contenido de nutrientes obtenidos tras el tratamiento de lodos de aguas residuales.

Construcción sostenible. También conocida construcción sustentable se refiere a un enfoque de diseño y construcción de edificaciones que tiene en cuenta la optimización del consumo de energía, la conservación de los recursos naturales y la reducción de impactos ambientales.

Economía circular. Término económico y ambiental que se enfoca en el uso efectivo de recursos y la reducción de residuos.

Gestión de residuos. Todas las acciones vinculadas al ciclo de vida de los desechos, englobando la recolección, el transporte y el procesamiento de estos.

PTAR (Planta de Tratamiento de Aguas Residuales). Involucra una secuencia de procedimientos y dispositivos que comprenden la eliminación de partículas en suspensión, la descomposición biológica de sustancias orgánicas, la desinfección para erradicar microorganismos nocivos, y la segregación de nutrientes.

SSA (Sewage Sludge Ash). Ceniza de Lodo Residual.

Resumen

Este trabajo de grado se enfoca en proponer una metodología para la utilización de lodos generados en PTAR, en la producción de bloques de concreto y su incidencia en la economía circular, promoviendo un enfoque en la sostenibilidad ambiental y la gestión eficiente de residuos.

La investigación se basa en un estudio de estado de arte de la adición de Ceniza de lodo residual (SSA) en bloques de concreto y avanza mediante la propuesta metodológica de una secuencia de fases secuenciales que engloban la caracterización de los lodos de PTAR, su implementación en la fabricación de bloques de concreto, cumpliendo calidades y resistencias en el sector de la construcción, generando un impacto eficaz en la economía circular, Fundamentado en casos de estudio que evidencian la utilidad y los logros tangibles.

Palabras clave: Biosólidos, Economía circular, Gestión de residuos, PTAR, SSA.

Abstract

This degree work focuses on proposing a methodology for the use of sludge generated in WWTP, in the production of concrete blocks and its impact on the circular economy, promoting a focus on environmental sustainability and efficient waste management.

The research is based on a state-of-the-art study of the addition of Waste Sludge Ash (SSA) in concrete blocks and advances through the methodological proposal of a sequence of sequential phases that encompass the characterization of WWTP sludge, its implementation in the manufacture of concrete blocks, meeting qualities and resistance in the construction sector, generating an effective impact on the circular economy, based on case studies that demonstrate the usefulness and tangible achievements.

Keywords: Biosolids, Circular economy, Waste management, WWTP, SSA.

Introducción

En un mundo donde la sostenibilidad y la gestión eficiente de recursos renovables y no renovables se han convertido en necesidad imperativa ambiental y económica, la búsqueda de prácticas que promuevan la economía circular se vuelve esencial.

En este contexto, la administración de los lodos producidos en las PTAR se presenta como una oportunidad importante para enfrentar los desafíos vinculados a la gestión de desechos y la optimización de recursos en la industria de la construcción. Este trabajo de investigación analiza y propone el uso de lodos de PTAR en la industria de la construcción, y de manera concreta, en la fabricación de bloques de concreto, con un enfoque claro en la sostenibilidad y la economía circular.

Los bloques de concreto representan un elemento importante en la edificación y la expansión de infraestructura, por lo que su fabricación conlleva una notable necesidad de recursos naturales y energía. Por lo tanto, el establecimiento de una metodología que facilite la inclusión de lodos de PTAR en la producción de bloques de concreto podría convertirse en una eficaz estrategia de gestión de residuos. Al combinar la gestión responsable de los lodos con la fabricación de un material de construcción ampliamente utilizado, estamos contribuyendo a la disminución de desechos y la preservación de los recursos naturales.

El presente trabajo no solo busca proponer una innovadora alternativa en la gestión de lodos de PTAR, sino también contribuir al enriquecimiento de la aplicación del concepto de economía circular en el sector de la construcción, que promueve el reciclaje, la reutilización, la eficiencia energética y la minimización de desechos, los cuales se presentan como pilares fundamentales para un futuro más sostenible, todo esto gracias a los casos de estudio, los cuales

servirán como referente en la viabilidad de la producción de bloques de concreto brindando una visión práctica de su aplicabilidad en situaciones reales.

1. Problema

1.2. Identificación

La gestión de residuos provenientes de PTAR representa un desafío significativo en términos de manejo de residuos y sostenibilidad ambiental. Estos lodos, abundantes en nutrientes y compuestos orgánicos, requieren una disposición adecuada que a menudo involucra costos considerables para su eliminación o tratamiento. El problema radica en la falta de un enfoque metodológico integral que aborde tanto la gestión de lodos de PTAR como la producción de bloques de concreto desde una perspectiva de economía circular, es decir, la falta de una metodología que permita transformar estos lodos en un recurso útil en la producción de bloques de concreto, lo que resulta en una disminución de costos de disposición y minimizando la extracción de recursos naturales, todo ello mientras se promueve la sostenibilidad y se cierran los ciclos de materiales. Este desafío plantea interrogantes sobre la viabilidad técnica, económica y ambiental de tal enfoque, lo que justifica la necesidad de investigar y desarrollar una metodología específica en este contexto.

Se inicia el análisis de la investigación mediante una matriz DOFA presentada en la Tabla 1, en la cual se hace una evaluación de las debilidades, oportunidades, fortalezas y amenazas para proponer una metodología que busque aprovechar las fortalezas y oportunidades y mitigar las debilidades y amenazas en la fabricación de bloques de concreto con adición de SSA (ceniza de lodo residual) y el análisis de su impacto en la economía circular:

DOFA

Tabla 1. DOFA Para adicionar SSA en bloques de concreto

DOFA	
<p>Debilidades (D):</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Tecnologías Limitadas: Falta de tecnologías avanzadas y adaptadas para el tratamiento y reutilización de lodos residuales en el contexto colombiano. • Control de calidad: Garantizar que los bloques de concreto satisfagan con los criterios normativos y resistencia puede ser un desafío técnico. • Variabilidad de lodos: La composición de los lodos de PTAR puede variar significativamente, lo que puede dificultar la estandarización de la metodología.
<p>Oportunidades (O):</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Tendencia Global Sostenible: Creciente interés mundial en la construcción sostenible y la gestión de residuos, lo que podría influir en la incorporación de métodos de economía circular en Colombia. • Reducción de costos: La utilización de lodos de PTAR puede reducir los costos de eliminación de residuos y la necesidad de adquirir materiales para la fabricación de ladrillos de concreto.

DOFA	
	<ul style="list-style-type: none"> • Innovación Tecnológica: Posibilidad de desarrollar y adaptar tecnologías de tratamiento y reutilización de lodos residuales que sean apropiadas para las condiciones colombianas.
Fortalezas (F):	<ul style="list-style-type: none"> • Recursos Humanos Calificados: Disponibilidad de expertos técnicos y profesionales en Colombia capaces de desarrollar e implementar tecnologías de economía circular. • Conciencia Ambiental en Crecimiento: Mayor conciencia en la concienciar a la sociedad colombiana acerca de la relevancia de la sostenibilidad y el compromiso ambiental. • Potencial de Colaboración: Posibilidad de establecer alianzas entre gobiernos, empresas y organizaciones para promover la economía circular en la construcción.
Amenazas (A):	<ul style="list-style-type: none"> • Resistencia al Cambio: Posible resistencia por parte de la industria de la construcción a adoptar enfoques innovadores y cambiar prácticas tradicionales.

DOFA	
	<ul style="list-style-type: none"> • Falta de Políticas Claras: Ausencia de políticas gubernamentales específicas que respalden y promuevan la adopción de la economía circular en el proceso de tratamiento de lodos residuales. • Escasez de Inversiones: La insuficiencia de inversiones por entidades gubernamentales como por empresas privadas, en la investigación y desarrollo de tecnologías relacionadas con la economía circular en Colombia.

Nota: Elaboración propia del autor.

1.2. Descripción

Las PTAR generan grandes cantidades de lodos residuales como subproducto del proceso de tratamiento del agua, y actualmente, estos lodos suelen ser desechados o dispuestos en vertederos sin una explotación efectiva de su potencial.

Este problema se sustenta en datos y hechos concretos: en muchas regiones, los lodos de las PTAR se acumulan en vertederos, ocupando espacio valioso y, en algunos casos, contribuyendo a la contaminación que es un resultado de esta situación, lo cual implica costos considerables tanto en el transporte como en la eliminación de estos desechos.

Al mismo tiempo, la industria de la construcción se basa en la utilización de recursos y energía intensiva para la fabricación de materiales como el concreto usado para la fabricación de bloques. La falta de reutilización de los lodos de las PTAR representa una oportunidad desaprovechada para cerrar este ciclo de recursos.

Existe la necesidad de transformar la gestión de los biosólidos de un enfoque de eliminación a un enfoque de aprovechamiento sostenible. Esto implica caracterizar los lodos de manera integral para comprender sus propiedades y comportamiento, y determinar su viabilidad en calidad como insumo en la producción de bloques de concreto. Resolver este problema no solo reduciría la presión sobre los vertederos y el entorno, sino que también ofrecería beneficios económicos, ambientales y sociales al aprovechar un recurso subutilizado en la construcción sostenible y promover una economía más circular.

1.3. Planteamiento

¿Cómo se puede desarrollar una metodología efectiva para usar lodos de PTAR en la producción de bloques de concreto, promoviendo la economía circular y la sostenibilidad ambiental, con un enfoque técnico basado en los casos de estudio?

2. Delimitación

Dentro de este alcance, se abordará la viabilidad técnica de mezclar los lodos de PTAR con los ingredientes convencionales utilizados en la fabricación de bloques de concreto, evaluando a partir de casos de estudio, su influencia en las propiedades de estos. Además, se explorará el impacto ambiental de esta práctica en términos de reducción de residuos y consumo de energía, centrándose en la perspectiva de la economía circular.

Se realizarán evaluaciones de casos particulares que ya han aplicado el uso de lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales en la fabricación de ladrillos de concreto. Estos casos de estudio permitirán comprender los desafíos y beneficios en términos técnicos, económicos y ambientales en contextos prácticos y reales. Es importante mencionar que la investigación no abordará aspectos más amplios de la construcción con concreto ni explorará otros materiales ni aplicaciones alternativas para los lodos de PTAR.

El trabajo se enfoca en la aplicación práctica de esta iniciativa en la dentro del sector de la construcción, con la finalidad de utilizar o beneficiarse de los lodos como un recurso valioso y reducir la generación de residuos. A través de casos de estudio, se ejemplificará cómo esta práctica puede beneficiar a la sostenibilidad en la construcción, promoviendo la reutilización de recursos y mejorar la eficiencia en el uso de recursos naturales.

Esta investigación busca aportar al entendimiento de la administración sostenible de los lodos de PTAR y su utilización en la economía circular, con la meta de proporcionar una opción factible y eco amigable en la fabricación de bloques de concreto.

3. Objetivos

3.1. Objetivo General

Proponer una metodología para el uso de lodos provenientes de PTAR para la elaboración sostenible de bloques de concreto y su impacto en la economía circular.

3.2. Objetivos Específicos

- Analizar los impactos ambientales potenciales de la utilización de lodos residuales en la producción de bloques de concreto, considerando aspectos como reducir la necesidad de recursos naturales, disminuir la producción de residuos y potencialmente mejorar el impacto ambiental en términos de emisiones de carbono en la construcción.
- Identificar si es factible y beneficioso utilizar lodos de la PTAR en la producción de ladrillos de concreto, asegurando mediante un diseño de mezcla apropiado que estos bloques cumplan con los estándares de calidad y desempeño requeridos.
- Proponer una metodología para la optimización del uso de lodos residuales en la fabricación de bloques de concreto sostenible, teniendo en cuenta aspectos como la caracterización de los Biosólidos, el diseño de mezcla y la evaluación de propiedades de los bloques.
- Aportar en el conocimiento para fomentar prácticas más responsables y sostenibles en el ámbito de la construcción y de esta manera contribuir positivamente a la implementación de una economía circular.

4. Antecedentes

Al estudiar la vasta fuente de información que representan estos estudios, podemos obtener valiosas perspectivas sobre enfoques, metodologías y hallazgos relevantes que han surgido en contextos similares. Esta revisión de la literatura no solo proporciona una base sólida para esta investigación, sino que también contribuye a contextualizar y enriquecer nuestra comprensión de los desafíos y oportunidades que se abordan al abordar la temática central de este estudio.

Integrar biosólidos en la manufactura de ladrillos representa una posibilidad para disminuir el impacto ecológico tanto en la industria de la construcción como en el procesamiento de aguas residuales. Esto se alcanza mediante la reutilización de residuos orgánicos generados en las PTAR y reducir la dependencia de la extracción de recursos naturales no renovables. La adición de biosólidos puede disminuir el consumo de energía durante la fabricación de los bloques lo que puede generar ahorros en los costos de producción (BELLO, 2021).

La implementación de esta alternativa en el sector de la construcción abre la puerta a la creación de un enfoque completamente nuevo centrado en la sostenibilidad y el cuidado del medio ambiente. Además, promueve la adopción de un modelo más sustentable en la industria de fabricación de ladrillos, al tiempo que mejora la gestión de las aguas residuales. Al reemplazar hasta un 20% de los materiales primarios utilizados en la fabricación de ladrillos, se aplican directamente los principios de la economía circular, lo que contribuye a una gestión más responsable de los recursos naturales y prolonga la vida útil de las reservas de arcilla. Esto, a su vez, preserva este recurso y reduce de manera significativa el impacto ambiental relacionado con la explotación de los mismos. En resumen, esta opción en el campo de la construcción allana el camino para un enfoque innovador basado en una cultura de sostenibilidad y respeto hacia el

entorno natural, alentando simultáneamente una transformación sostenible en la industria de producción de ladrillos en concreto y una gestión más efectiva de las aguas residuales (MORENO, 2021).

En cuanto al comportamiento tecnológico y ambiental de la ceniza de biosólidos en materiales a base de cemento para la elaboración de concreto, Los resultados muestran que la SSA está compuesta por granos irregulares con una alta área superficial específica, lo que conduce a una demanda de agua significativamente alta. Los resultados también indican que la SSA tiene un efecto positivo a largo plazo, se observa un incremento en la capacidad de soportar fuerzas de compresión de los materiales elaborados con cemento, lo cual podría estar vinculado a una actividad puzolánica leve. No obstante, los efectos a corto plazo en la resistencia a la compresión son menos pronunciados que los evidenciados en los morteros de referencia que carecen de residuos (Martin, 2007).

Con respecto al impacto que puede tener esta investigación dentro del marco de la economía circular, la reutilización, que implica la transformación de residuos como los biosólidos en nuevos objetos y materiales, se ha reconocido como un paso fundamental en la industria de la construcción (Chethana, 2023).

5. Justificación

Este trabajo de investigación se sustenta en una confluencia de razones técnicas, sociales y económicas que resaltan su considerable relevancia y utilidad. Desde una perspectiva técnica, la reutilización de lodos de PTAR en la producción de bloques de concreto puede ser una estrategia efectiva para contribuir a gestionar estos desechos de manera sostenible. Esta estrategia de construcción disminuye la dependencia de recursos naturales tradicionales y, al mismo tiempo, mitiga el impacto ambiental relacionado con la industria de la construcción. La adopción de prácticas más sostenibles en la producción de concreto podría tener un efecto positivo en la calidad del aire y la salud pública, al reducir la exposición a desechos no utilizados. Esto impulsa un enfoque más responsable y beneficioso para el medio ambiente en la construcción, al mismo tiempo que promueve un entorno más saludable para las comunidades circundantes. Además, podría generar oportunidades laborales en la industria de la construcción sostenible. Económicamente, la implementación de esta práctica podría tener un impacto positivo en la economía al fomentar la circularidad de recursos, reducir costos de eliminación de lodos y probablemente aumentar la competitividad de la industria de la construcción.

5.1. Gestión de Residuos.

La reutilización de estos lodos en la elaboración de bloques de concreto presenta una oportunidad para cerrar el ciclo de residuos y reducir la presión sobre los vertederos, al mismo tiempo que este enfoque contribuye de manera significativa a la conservación de los recursos naturales y a la disminución del impacto medioambiental.

Los resultados de los estudios en esta área subrayan que la gestión integral de residuos orgánicos y aguas residuales, como la reutilización de materiales en la industria de la construcción, ofrece notables beneficios tanto desde una perspectiva medioambiental como

económica en comparación con los métodos convencionales de manejo de desechos. Además, las investigaciones hacen hincapié en la importancia de la colaboración entre diversos actores y la participación de la comunidad en la implementación de prácticas sostenibles de gestión de residuos (Thomsen, 2018).

5.2. Innovación en la Construcción.

La incorporación de lodos residuales en la construcción sostenible promueve la innovación en la construcción, lo que puede tener un impacto positivo en la eficiencia y la resiliencia de las infraestructuras.

La industria de la construcción está impulsando la innovación ambiental al fomentar la utilización de materiales locales y residuos, lo que resulta en una reducción significativa de los gastos asociados con la fabricación y el transporte. Esta estrategia tiene un efecto directo en la eficiencia energética y la reducción de la contaminación ambiental, ya que se minimiza la necesidad de transportar materiales a largas distancias y se aprovechan de manera más efectiva los recursos disponibles en la zona, contribuyendo así a la conservación del medio ambiente y al ahorro de recursos valiosos (Acosta, 2019).

5.3. Ambiental y Sostenibilidad

Mediante la creación de enfoques eficaces en el tratamiento y transformación de estos lodos, se está promoviendo una reducción en la demanda de recursos naturales, una disminución en la producción de residuos y una mitigación de los efectos adversos sobre el entorno. Del mismo modo, al identificar enfoques óptimos para su procesamiento y uso en la construcción, se está fomentando un cambio en la manera en que gestionamos los residuos, promoviendo la economía circular y aliviando la presión sobre los vertederos y sistemas de disposición.

El aprovechamiento de las SSA en la producción de materiales de construcción representa una oportunidad para la disminución de la cantidad de residuos generados y para la reducción de la necesidad de recursos naturales, lo que resulta en un doble beneficio para la sostenibilidad, tanto en términos medioambientales como económicos (Cyr, 2007).

5.4. Económico y Eficiencia Empresarial

Desde una perspectiva económica, la reutilización de lodos residuales podría reducir los costos asociados con la adquisición de materias primas tradicionales. Teniendo en cuenta lo anterior, esta investigación podría demostrar cómo esta práctica en materiales como el concreto puede ser financieramente viable, lo que a su vez podría aumentar la competitividad de las empresas que adopten estos métodos en la construcción sostenible.

Es esencial impulsar el uso de materiales reciclados mediante la expansión de las operaciones a gran escala. Además, tanto las autoridades regulatorias como las empresas del sector de la construcción deben desempeñar un rol activo en la consecución de la circularidad en la industria de la construcción. Es relevante destacar que la adopción de la economía circular en la construcción todavía se encuentra en una etapa incipiente, y es necesario llevar a cabo más investigaciones para evaluar el impacto de las emisiones de gases de efecto invernadero y aprovechar al máximo los beneficios que brindan las tecnologías digitales en esta perspectiva.

5.5. Contribución al Desarrollo Sostenible

Este estudio está enfocado en la misma dirección de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), especialmente con aquellos que se centran en la gestión de recursos, la construcción sostenible y la lucha contra el cambio climático.

6. Marco de Referencia

Este trabajo de investigación se enmarca en la integración de la gestión de residuos de PTAR, los materiales de construcción sostenibles y los principios de la economía circular, con el propósito de abordar la problemática de la generación de lodos residuales y su potencial reutilización en la producción de bloques de concreto, los cuales a su vez encuentran aplicación en proyectos de construcción sostenible.

6.1. Marco Teórico

6.1.1. Gestión de residuos

Abarca la programación, recopilación, transporte, tratamiento y disposición definitiva de los desechos, con el fin de reducir al mínimo su daño ambiental y cumplir con las normativas correspondientes (UNEP, 2021). Los lodos residuales, que resultan como subproducto del proceso de depuración de aguas, se presentan como un desafío en la gestión de residuos debido a su contenido de sustancias contaminantes (Bao, Li & Shi, 2021).

La gestión adecuada de los residuos en una PTAR es crucial no solo para garantizar el acatamiento de las normativas ambientales, sino también para generar beneficios económicos y ambientales significativos. La recuperación de recursos a partir de los lodos, como la producción de biogás o la transformación en productos reutilizables, puede disminuir los gastos de funcionamiento y la huella de carbono. Adicionalmente, la correcta manipulación y disposición de los productos químicos residuales aseguran que no se generen impactos negativos en la calidad del agua y en el ecosistema circundante. En resumen, una administración eficiente de los desechos en una PTAR resulta fundamental para salvaguardar la salud de la población y el

entorno natural, al tiempo que promueve la sostenibilidad y la eficiencia en la operación de la gestión de residuos.

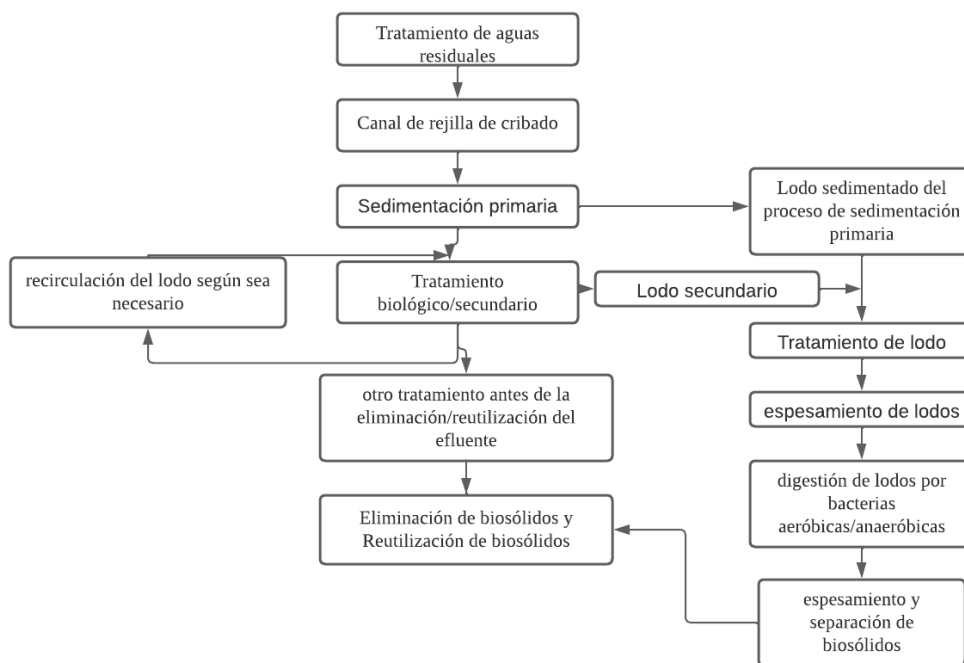
6.1.2. Generalidad de los lodos residuales

Los lodos residuales, desempeñan un papel fundamental en el proceso de purificación y tratamiento de aguas residuales en PTAR, ya sean de origen urbano o industrial. Estos lodos se generan como resultado de la sedimentación y separación de partículas sólidas y materia orgánica presentes en el agua residual durante su proceso de tratamiento. A medida que el agua avanza a través de las distintas etapas de la PTAR, las partículas en suspensión se agrupan y se precipitan, formando esta mezcla compuesta por componentes sólidos y líquidos, que conocemos como lodo residual o biosólidos.

La transformación de lodos residuales en biosólidos implica un proceso de tratamiento que tiene como objetivo convertir los lodos en un material más seguro y provechoso para su aplicación en diversas áreas. Los lodos residuales son normalmente producidos en grandes cantidades y requieren de un tratamiento previo de estabilización para de esta manera hacerlos adecuados para un uso posterior (Mahamud, 2006).

En la Figura 1 se representa a rasgos generales el proceso que se lleva a cabo en el tratamiento de aguas residuales, desde el inicio hasta la obtención de los biosólidos y/o lodos.

Figura 1. Proceso general de Tratamiento de aguas residuales.



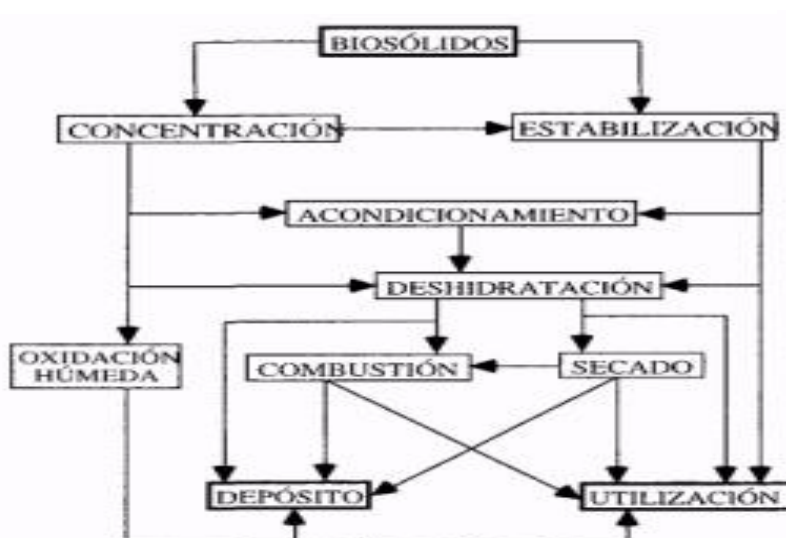
Nota: Tomado de, Aplicación de Biosólidos en Ingeniería Civil: estado del arte (Wanare, 2022).

Los tratamientos de estabilización de los biosólidos tienen como objetivos primordiales la reducción de su capacidad para descomponer y erradicar microorganismos patógenos, lo que los convierte en apropiados para su uso futuro. Estos procedimientos generan un producto que contiene una carga de microorganismos disminuida, lo que lo hace más idóneo para su manipulación y contacto con seres humanos. Existen dos enfoques principales para eliminar la materia orgánica que se encuentra en los biosólidos dentro del proceso de tratamiento. Uno de ellos implica el uso de la oxidación con aire en fase acuosa, mientras que el otro se basa en la incineración. Estos métodos logran, en su mayoría, la eliminación completa o casi total de la materia orgánica presente en el lodo, lo que conlleva a una marcada reducción en el volumen y la

obtención de un residuo más fácil de manejar, que prácticamente no presenta actividad biológica. En líneas generales, los procesos de tratamiento de lodos se pueden clasificar en dos grandes categorías: aquellos que buscan estabilizar los lodos y los que se orientan hacia la reducción o eliminación de su componente orgánico (Mahamud, 2006).

En la Figura 2 se representa a rasgos generales el proceso que se lleva a cabo en un proceso de tratamiento de estabilización de biosólidos.

Figura 2. Procesamiento de biosólidos.



Nota: Tomado de biosólidos generado en la depuración de aguas: (ii). métodos de tratamiento (Mahamud, 2006).

Los biosólidos se caracterizan por poseer una combinación de componentes que incluye materia orgánica, nutrientes esenciales como el nitrógeno y el fósforo, microorganismos beneficiosos, así como ciertos contaminantes residuales. La composición de los biosólidos puede fluctuar en función de la fuente de las aguas residuales y del método específico de tratamiento empleado. Estos clasifican en diferentes categorías, generalmente de acuerdo con sus niveles de

contaminantes y patógenos. Las categorías van desde Clase A, que tiene los niveles más bajos de contaminantes y patógenos, hasta Clase B, que tiene niveles ligeramente más altos pero que aún pueden ser utilizados en aplicaciones controladas (KINNEY, 2016).

Es relevante señalar que los biosólidos deben ser analizados y caracterizados de acuerdo con las directrices establecidas en la Tabla 2 que propone la normativa en el decreto 1287 de 2014.

Tabla 2. Variables de caracterización de biosólidos para su uso.

Criterio	Variable
Químicos- Metales	<i>Arsénico (As)</i>
	Cadmio (cd)
	Cobre (Cu)
	Cromo (Cr)
	Mercurio (Hg)
	Molibdeno (Mb)
	Niquel (Ni)
	Plomo (Pb)
	Selenio (Se)
	Zinc (Zn)

Criterio	Variable
Microbiológicos	Coliformes fecales
	Huevos de helmintos viables
	Salmonella Sp.
	Virus entéricos

Nota: Tomado del Decreto 1287 de julio 10, 2014. Presidencia de la Republica (Colombia).

De acuerdo con el Decreto 1287 de 2014 en la categoría y clasificación, los biosólidos se dividen en categoría A y B. Para el caso de esta investigación la categoría que debe ser usada es la B, esto debido a que según la normativa estos biosólidos se pueden usar Como componente utilizado en la producción de materiales de construcción.

En el caso de los biosólidos destinados a aplicaciones distintas de la agrícola como es el caso de esta investigación, el productor de dichos biosólidos debe llevar a cabo la caracterización por lotes según lo detallado en la Tabla 3.

Tabla 3. Producción de Biosólidos y frecuencia de análisis

Producción de biosólidas toneladas/ año de biosólido (base seca).	Frecuencia mínima de análisis
<300,0	Anual
300,0 – 1500,0	Semestral

Producción de biosólidos toneladas/ año de biosólido (base seca).	Frecuencia mínima de análisis
>1500.0 – 15.000,0	Trimestral
>15.000,0	Mensual

Nota: Tomado del Decreto 1287 de julio 10, 2014. Presidencia de la Republica (Colombia).

6.1.3. Construcción sostenible

La construcción sostenible se orienta a la planificación y desarrollo de edificaciones que respeten los principios ambientales, sociales y económicos, considerando la interacción entre el entorno construido y el natural (Huovila, 2019). Este enfoque involucra la selección de materiales amigables con el medio ambiente, La atención a la eficacia en el uso de energía, la gestión óptima de recursos y la disminución de desechos en proyectos de edificación y demolición (GBCI, 2021).

Este ámbito considera la elección de materiales sostenibles y la reducción de residuos. La utilización de materiales reciclados o renovables y la minimización de desechos de construcción son prácticas comunes en la construcción sostenible. Además, se pone un fuerte énfasis en la calidad del ambiente interior, fomentando un espacio saludable y agradable para los habitantes. Esto se consigue al mejorar la pureza del aire, aprovechar la luz natural y administrar de manera efectiva el consumo de agua. En resumen, la construcción sostenible no solo beneficia al entorno ecológico, sino que también mejora significativamente la calidad de vida de las personas y puede generar ahorros económicos.

La valorización de los biosólidos en la producción de materiales aplicados en la llamada construcción sostenible es una estrategia conveniente en términos ambientales, ya que se evitan los impactos negativos asociados con el depósito final de los lodos en un vertedero sanitario (RUIZ, 2021).

Los biosólidos tienen un gran potencial en la industria de la construcción gracias a sus niveles controlados de metales y patógenos, así como a su contenido de óxidos y materia orgánica, lo que los convierte en un material adecuado para su incorporación en mezclas con otros materiales como arcilla y cemento. Un ejemplo destacado es la posibilidad de crear ladrillos con un contenido de aproximadamente el 5% de biosólidos, los cuales presentan una porosidad residual que les confiere una mayor ligereza y una capacidad efectiva de transferencia de calor, según lo indican los valores de conductividad térmica obtenidos. Además, es importante señalar que los porcentajes de biosólidos pueden aumentar durante el proceso industrial, gracias a la implementación de equipos automáticos que estandarizan los procedimientos y reducen al mínimo los errores que puedan haberse observado en el laboratorio (RUIZ, 2021).

6.1.4. Mampostería

La mampostería es una técnica de construcción que ha sido utilizada durante siglos en todo el mundo. Consiste en la disposición de piedras, ladrillos u otros materiales similares de forma estratégica para crear estructuras sólidas y duraderas. Sin embargo, en la actualidad, se ha vuelto esencial considerar la sostenibilidad en la construcción, debido a los efectos negativos de la industria en el medio ambiente. Afortunadamente, existen formas de fabricar mampostería de manera sostenible.

El Código ASTM define los requisitos complementarios para mampostería estructural. En cuanto a los bloques de concreto, se recomienda emplear un espesor de pared de 24 mm, 26 mm y 28 mm para los bloques de 12 cm, 15 cm y 20 cm de espesor respectivamente, además de un espesor de pared de 25 mm para el bloque modular, según los resultados obtenidos en un estudio de propiedades geométricas (Navas, 2014).

Teniendo en cuenta el objetivo de esta investigación, una de las formas de lograr la sostenibilidad en la fabricación de mampostería es utilizar materiales locales y reciclados. En lugar de importar piedras o ladrillos de lugares lejanos, se pueden aprovechar los recursos disponibles en la región, reduciendo así la cantidad de emisiones de carbono vinculadas al desplazamiento. Además, se pueden reciclar materiales de construcción previamente utilizados, como ladrillos recuperados de demoliciones, para darles una segunda vida en nuevas construcciones. Esto no solo reduce la demanda de recursos naturales, sino que también minimiza los desechos de construcción y promueve la economía circular. Además, la selección de métodos constructivos que sean energéticamente eficientes, como el uso de mampostería con aislamiento térmico, puede mejorar aún más la sostenibilidad de las edificaciones al disminuir el gasto energético destinado a la calefacción o el enfriamiento. Cuando la mampostería se fabrica de manera sostenible, Tiene el potencial de generar un impacto ambiental notablemente menor en la industria de la construcción.

6.1.5 Concreto celular

Las mezclas de concreto para la fabricación de bloques que no contienen material granular, como arena o grava, son generalmente llamadas "bloques de concretos livianos" o "bloques de concreto celular". Estos bloques están diseñados específicamente para ser más

ligeros que los bloques de concreto tradicionales y tienen algunas características distintivas como lo son la adición de materiales alternativos y el mayor aislamiento.

El concreto celular es un material de construcción innovador y versátil que se caracteriza por su ligereza y propiedades aislantes. Se produce al mezclar cemento, arena y agua. Este es un material mucho más ligero que el concreto convencional. A pesar de su peso reducido, el concreto celular conserva una notable resistencia y durabilidad, lo que lo hace una elección apropiada para una variedad de usos en la industria de la construcción, incluyendo aislamiento térmico y acústico, relleno estructural y fabricación de bloques de concreto. Su capacidad para mejorar la eficiencia energética y proporcionar una mayor comodidad lo convierten en una opción cada vez más extensamente empleado en el sector de la construcción.

Teniendo en cuenta El enfoque primordial de esta investigación, los análisis han demostrado que los concretos celulares fabricados con una adición del 10% de reemplazo de cemento por SSA cumplen con los requisitos mecánicos de la norma europea para casos en términos de fuerza bajo compresión durante las primeras fases de endurecimiento (Brotons, 2014).

A continuación, en la Tabla 4 se presentan las diferentes dosificaciones que se han estudiado más frecuentemente de concretos con adición de SSA.

Tabla 4. Dosis para concretos celulares en gramos por mezclas y porcentajes

CONCRETO CELULAR						
MUESTRA DE REFERENCIA		ARENA	CEMENTO	ADICION SSA (Reemplazo)		WATER
0	C	1350	450	-	-	225
1	AS	1350	450	22.5	5%	236.3
2	A10	1350	450	45	10%	247.5
3	A15	1350	450	67.5	15%	258.8
4	A20	1350	450	90	20%	270
5	A15 (MD)	1350	450	67.5	15%	258.8
6	Ss10	1215	450	135	10%	298.5

Nota: Tomado de Portland cement systems with addition of sewage sludge ash.

Para llegar a una dosificación óptima para la propuesta de esta metodología, se diseña una escala con varios niveles de incorporación de SSA en comparación con la cantidad de cemento empleada en la producción de bloques de hormigón, lo que conlleva crear un conjunto de mezclas de concreto con diferentes proporciones de SSA y cemento. En este caso, se propone utilizar cuatro porcentajes diferentes de adición de SSA en relación al cemento: 5%, 10%, 15% y 20%. Para el caso de las proporciones de SSA con respecto a la arena se puede proponer hasta un 30% en relación con la misma.

Los concretos celulares fabricados con una adición del 10% de reemplazo de cemento por SSA cumplen con los requisitos mecánicos de la norma europea en términos de capacidad de soportar compresión en etapas iniciales y resistencia estándar a la compresión. Incluso en algunas pruebas se obtienen mejores propiedades con respecto al concreto sin adición de SSA (Brotonsa, 2014).

6.1.6. Economía circular

Se basa en la idea fundamental de minimizar la utilización de recursos naturales y reducir la generación de residuos a través de la práctica de la reutilización, el reciclaje y la regeneración de materiales (Ellen MacArthur Foundation, 2021). Este enfoque fomenta la conversión de los desechos en valiosos recursos, en consonancia con la visión de avanzar hacia una economía más sostenible y eficiente (Geissdoerfer et al., 2017).

Uno de los pilares esenciales de la economía circular se encuentra en su capacidad para reducir el impacto ambiental y contribuir a la lucha contra el cambio climático. Al cerrar los ciclos de materiales y energía, se disminuye la presión sobre los ecosistemas y se logra una reducción en las emisiones de gases de efecto invernadero. Además, este enfoque puede impulsar la innovación y la competitividad empresarial al promover la utilización más eficiente de los recursos y la creación de productos y servicios que sean más sostenibles desde un punto de vista medioambiental, por lo que esta representa un cambio hacia un sistema que es más equitativo, sostenible y resistente, con el potencial de generar beneficios tanto para la economía como para el medio ambiente.

En el sector de la construcción, la economía circular se enfoca en la reutilización de materiales y la minimización de desechos. Estos objetivos pueden alcanzarse mediante prácticas como el diseño sostenible, la reutilización de materiales existentes y la incorporación de materiales reciclados en los proyectos de construcción. Además de promover una gestión más responsable de los recursos, esta perspectiva ofrece una oportunidad para estimular la innovación y el desarrollo de nuevos materiales y tecnologías que tienen el potencial de reducir los costos y aumentar la eficiencia en la industria de la construcción (Smol, 2015).

6.2. Marco Legal y Normativo

6.2.1. Decreto 1287 de 2014

El Decreto 1287 de 2014 establece los criterios para el uso de los biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales en Colombia. Este decreto tiene como objetivo proteger la salud humana y el medio ambiente, al mismo tiempo que se promueve la reutilización de los biosólidos como acondicionadores de suelo y fertilizantes. El decreto establece los criterios técnicos y de calidad que deben cumplir los biosólidos para su uso en la agricultura y otros fines, y establece las responsabilidades de los productores, distribuidores y usuarios de los mismos.

Los criterios para el uso de los biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales en Colombia se establecen en el decreto. Entre ellos se incluyen la tasa máxima anual de aplicación (TMAA) de metales, la caracterización de los biosólidos, la tasa agronómica y la prevención de la distribución y uso de material que no cumpla con los valores máximos permisibles definidos en la Tabla 5 del decreto del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural.

Tabla 5. Valores Máximos permisibles de categorización de biosólidos para su uso

Criterio	Variable	Unidad de medida	Categoría biosólida	
			Valores máximo Permisibles	
Químicos – Metales	Arsenico (As)	Mg/Kg de biosóli	A	B
			20,0	4,0
	Cadmio (Cd)		8,0	40,0
	CObre (Cu)		1.000,0	1.750,0
	Cromo (Cr)		1.000,0	1.500,0
	Mercurio (Hg)		10,0	20,0

Criterio	Variable	Unidad de medida	Categoría biosólida	
			Valores máximo Permisibles	
Concentraciones maximas	Molibdeno (Mb)	do (Base seca)	18,0	75,0420,0
	Niquel (Ni)		80,0	420,0
	Plomo (Pb)		300,0	400,0
	Selenio (Se)		36,0	100,0
	Zinc (Zn)		2.000,0	2.80,0
Microbiológicos	Coliformes fecales	Unidades formadoras de colonias- UFC/g de biosólido (Base seca)	<1,00E (+3)	<2,00E (+6)
	Huevos de Helmintos Viables	Huevos de Helmintos Viables/4g de biosólido	<1,0	<10,0
	Salmonella Sp.	Unidades formadoras de	Ausencia	

Nota: Tomado del Decreto 1287 de julio 10, 2014. Presidencia de la Republica
(Colombia)

6.2.4. Resolución 0631 de 2015

La Resolución 0631 de 2015, emitida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia, establece las pautas y criterios para la disposición final de los lodos residuales generados en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) en el país.

La resolución define los lodos residuales como los sólidos generados en el proceso de tratamiento de aguas residuales, incluyendo los lodos primarios, secundarios y los biosólidos. De igual forma también prohíbe la disposición inadecuada de lodos residuales en cuerpos de agua, suelos o lugares no autorizados. Esto está en línea con la necesidad de evitar la contaminación ambiental y proteger la salud pública.

Existen normas técnicas y requisitos de calidad para el tratamiento, manejo y disposición de lodos residuales, las cuales pueden especificar los métodos y tecnologías apropiados para el tratamiento de los lodos residuales. Esto podría incluir procesos como la deshidratación, la digestión anaeróbica, el secado térmico, el compostaje, entre otros. Las normas pueden establecer requisitos de eficiencia y calidad para estos procesos como límites máximos permitidos para la concentración de contaminantes, como metales pesados, patógenos o sustancias orgánicas. De igual forma se especifican las diferentes normativas sobre el transporte de lodos residuales desde las PTAR hasta los lugares de tratamiento o disposición final, así como requisitos para el almacenamiento temporal de los lodos antes de su manejo final.

6.2.5. NTC 4026

El Título D del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 establece que las unidades de mampostería de concreto, arcilla cocida o sílice-calceas utilizadas en la construcción de mampostería estructural deben cumplir con las normas NTC 4026 (ASTM C90) para unidades de perforación vertical portante de concreto, NTC 4026 (ASTM C55) para unidades portantes de concreto macizas y NTC 4076 (ASTM C129) para unidades de concreto no estructurales. Además, se establecen requisitos específicos para las unidades de mampostería de perforación vertical en el documento, como la resistencia a la compresión, la absorción de agua y la resistencia al fuego.

Según la Norma Técnica Colombiana NTC 4026, los bloques y ladrillos de concreto deben cumplir con los requisitos establecidos en la norma para ser considerados aptos para mampostería estructural. Estos requisitos incluyen la resistencia a la compresión, la absorción de agua, la densidad, la planitud y la rectitud, entre otros. Además, se establecen dos clases de

unidades de mampostería de concreto para mampostería estructural, según su resistencia a la compresión: de resistencia alta (A) y de resistencia baja (B).

La prueba de resistencia a la compresión en unidades de mampostería de concreto se realiza en el momento de despacho al comprador, según lo establecido en la Tabla 3 de la Norma Técnica Colombiana NTC 4026. Esta prueba consiste en evaluar la resistencia a la compresión de las unidades de mampostería de concreto a los 28 días (R_{c28}), sobre el área neta promedia (A_{np}) de las unidades. Los requisitos de resistencia a la compresión se establecen en la Tabla 3 de la norma que se presentan a continuación, y varían según la clase de unidad de mampostería de concreto (A o B) y la densidad del concreto.

Tabla 6. Requisitos de resistencia a la compresión, absorción y clasificación de peso.

Resistencia a la compresión a los 28d (R_{c28}) ^B Evaluada sobre el area neta promedia (A_{np})			Absorción de agua (A_a)% según el peso (densidad) del concreto secado en horno, kg/m^3		
Mínimo ^B , Mpa			Promedio de tres unidades, máximo %		
Clase	Promedio de 3 unidades	Individual	Peso liviano, menos de $1680kg/m^3$	Peso mediano de 1680 kg/m^3 hasta menos de $2000 kg/m^3$	Peso normal $2000 kg/m^3$ o más
Alta	13	11	15%	12%	9%

Resistencia a la compresión a los 28d (Rc28) ^B Evaluada sobre el area neta promedia (Anp)			Absorción de agua (Aa)% según el peso (densidad) del concreto secado en horno, kg/m ³		
Baja	8	7	18%	15%	12%

Nota: Tomado de Norma Técnica Colombiana NTC 4026.

6.2.6. NTC 4076

La Norma Técnica Colombiana NTC 4076 establece los requisitos para unidades de mampostería, perforadas o macizas (bloques o ladrillos), de concreto, elaboradas con cemento hidráulico, agua, agregados minerales y aditivos, con la inclusión o no de otros materiales, aptas para elaborar mampostería no estructural, interior o exterior y para las chapas de concreto.

Establece dos tipos de unidades de mampostería de concreto: Tipo I, que requiere control de humedad, y Tipo II, que no lo requiere. Las unidades de Tipo I deben cumplir con todos los requisitos de la norma, incluidos los requisitos de contenido de humedad en la Tabla que según esta norma es el único parámetro en el que se diferencia al momento de cumplir con los parámetros que deben cumplir los bloques.

Tabla 7. Requisitos para el contenido de humedad en las unidades de mampostería tipo I.

Contracción lineal por secado ^{A,%}	Contenido de humedad máximo, como un % del valor total de la absorción de agua promedio de 3 unidades.		
	Condiciones de humedad en la obra o en el sitio de uso de las unidades		
	Húmeda	Intermedia	Seca
De menos de 0,03	45	40	35
De 0,03 hasta menos de 0,045	40	35	30
De 0,045 hasta 0,065 (como máximo)	35	30	25

Nota: Tomado de Norma Técnica Colombiana 4076.

6.2.7. Estrategia nacional de economía circular

Esta estrategia aborda diversos aspectos, incluyendo la gestión de los desechos sólidos en Colombia, y plantea una serie de estrategias para avanzar hacia una economía circular. En particular, resalta la necesidad de fortalecer el sistema de estadísticas para obtener un registro preciso del flujo de desechos sólidos y destaca la importancia de mejorar la gestión integral de estos desechos. Esto abarca la reducción en la generación de desechos, la promoción de la

reutilización, el fomento del reciclaje y una disposición final adecuada. Además, se hace hincapié en la importancia de la autogestión y la colaboración entre diversos actores involucrados en la gestión de desechos sólidos, incluyendo autoridades locales, empresas, organizaciones de recicladores y la sociedad en general.

Alguna de las estrategias que se proponen son:

- Fomentar el diseño para la circularidad en los productos y servicios, promoviendo la reutilización y el reciclaje de materiales.
- Implementar sistemas de gestión integral de residuos sólidos en los diferentes niveles territoriales, incluyendo la separación en la fuente, la recolección selectiva, el transporte, el tratamiento y la disposición final adecuada de los residuos.
- Fortalecer la cadena de valor del reciclaje, promoviendo la formalización y la inclusión social de los recicladores, así como la innovación y la inversión en tecnologías y procesos más eficientes.
- Fomentar la educación y la cultura ciudadana en torno a la economía circular y la gestión de residuos sólidos, promoviendo la participación activa de la sociedad civil en la toma de decisiones y la implementación de políticas públicas.

7. Metodología

La primera etapa del desarrollo de la metodología tiene como objetivo proporcionar una respuesta concreta a los objetivos establecidos. En esta fase inicial, se realiza un examen de las posibles repercusiones ambientales derivadas de la utilización de lodos residuales en la construcción sostenible de infraestructura, con un enfoque particular en el uso de SSA para evaluar la fabricación de bloques de concreto y fundamentar este estudio en la revisión de las últimas investigaciones y avances en el campo.

El uso de SSA en la construcción puede tener implicaciones para la calidad del agua y del suelo. Si las cenizas no se manejan adecuadamente, pueden filtrarse en el sustrato terrestre y provocar la contaminación de los acuíferos subterráneos. También pueden liberar contaminantes en el aire durante la manipulación y el transporte (Maozhe, 2013).

Los lodos de aguas residuales pueden contener una variedad de contaminantes, incluyendo metales pesados como plomo, cadmio y mercurio; así como compuestos orgánicos persistentes y otros contaminantes. Si estos agentes contaminantes son liberados en el entorno, podrían representar un riesgo para la salud humana y el equilibrio del ecosistema (Díaz, 2015).

Es importante tener en cuenta que estos riesgos pueden ser mitigados asegurando el respeto a las normativas medioambientales y la implementación de métodos adecuados de manejo, por ejemplo, las pruebas de lixiviación para evaluar la liberación de contaminantes de las cenizas y los monolitos de concreto producidos con ellas.

La utilización de SSA como reemplazo tanto del cemento como de la arena en la fabricación de concreto puede conllevar numerosos beneficios ambientales potenciales. En primer lugar, la producción de cemento es responsable de la emisión significativa de gases de

efecto invernadero, principalmente Dióxido de Carbono (CO₂). En segundo lugar, al incorporar SSA como sustituto del cemento, es factible reducir la cantidad de cemento requerida en la mezcla de concreto, lo que a su vez disminuye las emisiones de dióxido de carbono asociadas a la fabricación del cemento. Además, al ofrecer una aplicación alternativa para este subproducto, se reduce la cantidad de desechos destinados a vertederos, contribuyendo así a la disminución de la contaminación en suelos y aguas. Esta práctica no solo brinda ventajas medioambientales al reducir la huella de carbono y la generación de residuos, sino que también puede ser económicamente beneficiosa en términos de ahorro de costos en la producción de concreto (Maozhe, 2013).

En cumplimiento del primer objetivo específico, del anterior análisis realizado se podría decir que la utilización de SSA en la producción de bloques de concreto para reducir la necesidad de recursos naturales, disminuir residuos y mejorar las emisiones de carbono enfrenta desafíos ambientales. Sin embargo, destaca que el uso de SSA puede tener impactos negativos en la calidad del agua y del suelo si las cenizas no se manejan adecuadamente, provocando contaminación en acuíferos y liberación de contaminantes en el aire. Los lodos de aguas residuales también contienen contaminantes que pueden representar riesgos para la salud humana y el ecosistema. Aunque la utilización de SSA en la fabricación de concreto usado en la construcción ofrece beneficios ambientales potenciales, como la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y la disminución de residuos, abordar efectivamente estos desafíos mediante el cumplimiento de normativas y prácticas de manejo ambiental es esencial para maximizar los beneficios y minimizar los riesgos asociados.

A continuación, se describen una serie de etapas para proponer una metodología que pueda orientar la creación sostenible de bloques de concreto mediante la utilización de SSA y su influencia en el contexto de la economía circular.

7.1. Tratamiento y Caracterización de los Biosólidos

Principalmente se debe recalcar que en una PTAR se lleva a cabo un proceso que implica varias etapas, como la sedimentación, la filtración, la aireación y la desinfección, diseñadas para eliminar contaminantes físicos, químicos y biológicos del agua residual. Sin embargo, durante este proceso, también se generan subproductos sólidos conocidos como biosólidos los cuales son básicamente la propuesta de materia prima en la que se enfoca esta investigación para su posterior uso como insumo en el concreto usado para la fabricación de bloques.

Se requiere realizar un proceso de evaluación y medición de las propiedades físicas, químicas y biológicas de los biosólidos producidos en las plantas de tratamiento de aguas residuales. Es crucial tener en cuenta que esta investigación se lleva a cabo en Colombia y, en consecuencia, debe seguir las pautas establecidas en el Decreto 1287 de 2014, que regula los procedimientos relacionados con la utilización de los biosólidos provenientes de los lodos. Es fundamental asegurarse de que los biosólidos cumplan con los valores máximos permitidos que se presentaron anteriormente en la Tabla 5 Valores Máximos permisibles de categorización de biosólidos para su uso, la cual los clasifica en las categorías A y B.

Según lo estipulado en las normativas del decreto, resulta crucial resaltar que los biosólidos clasificados como categoría B pueden desempeñar un papel en la composición de materiales utilizados en la construcción. Por lo tanto, es imperativo garantizar la conformidad con los valores máximos permitidos para esta categoría a través de la ejecución de análisis de laboratorio. Estos análisis deben estar basados en la media geométrica de los resultados

obtenidos a partir de, al menos, siete (7) muestras extraídas de cada lote de producción. De esta manera, se pueden determinar y asegurar las condiciones de calidad necesarias para su uso en dicha aplicación (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2014).

Partiendo del supuesto en el que se tiene la cantidad de biosólidos categoría B que cumple con los valores permisibles de metales y microbiológicos para su uso en bloques de concreto, estos deben pasar a un proceso de incineración en una planta adecuada para dicho proceso y llegar a aplicar una temperatura máxima de 800 °C, los cuales se usarán posteriormente como insumo para adicción al cemento en el proceso de producción.

7.2. Estudio de Diseño de Mezcla

A partir de del estudio del estado del arte realizado y teniendo en cuenta lo establecido anteriormente en la Tabla 4 se puede proponer que la adición de SSA en el concreto para la fabricación de bloques sea de un 10% en adición a la mezcla para su reemplazo en la dosificación del material de cemento que se adiciona a la mezcla (Brotonsa, 2014).

Los materiales usados para la mezcla a proponer son cemento Portland, arena, cenizas de lodos de PTAR, y agua. Teniendo en cuenta las diferentes dosificaciones que se recomiendan en las investigaciones citadas en este trabajo, se plantea una dosificación que en sus resultados presenta resistencias mecánicas similares o mejores a las mezclas sin SSA y que a su vez mejora el comportamiento en términos de densidad, absorción y capilaridad.

Lo identificado en la revisión del estado del arte demuestra que los mejores resultados en cuestión ambiental y de propiedades mecánicas son para la adición de SSA en relación con el cemento, por lo que se plantea en esta metodología realizarlo de esta manera.

La dosificación que se propone en esta metodología es la siguiente:

Tabla 8. Dosificación Metodológica

MATERIAL	PROPORCIÓN (PARTES)
Arena	0.3
Cemento	2.7
SSA (Ceniza de lodo residual)	0.3
Agua	0.5

Nota: Elaborada por el autor

7.3.Fabricación de Bloques

Según el manual para la fabricación de bloques de concreto del servicio nacional de aprendizaje, el proceso de fabricación se puede llevar a cabo cumpliendo las siguientes etapas:

7.3.1. Preparación de materiales

Almacenar los materiales anteriormente propuestos en un lugar limpio y seco para evitar la contaminación. Medir y pesar los materiales según las proporciones deseadas en la mezcla. Cabe recalcar que las proporciones y cantidades exactas pueden variar según las necesidades del proyecto.

7.3.2. Mezcla de los materiales

En un mezclador de concreto, comenzar agregando el cemento Portland y la ceniza (SSA) en seco. Mezclar estos ingredientes en seco hasta que estén bien combinados. Agregar gradualmente la arena mientras se continúa mezclando. Asegúrate de una distribución homogénea de todos los componentes.

Añadir agua gradualmente para obtener la consistencia adecuada en la mezcla. La cantidad de agua puede fluctuar de acuerdo a las condiciones locales y los requisitos particulares del proyecto. La mezcla debe ser lo suficientemente húmeda para ser moldeada en bloques, pero no excesivamente húmeda para evitar la segregación.

7.3.3. Moldeo de bloques

Fundir la mezcla en los moldes para bloques de concreto. Compactar adecuadamente la mezcla en los moldes para eliminar posibles bolsas de aire.

7.3.4. Desmoldeo

Después de llenar los moldes, permitir que los bloques de concreto se endurezcan en el molde durante al menos 24 horas. Desmoldar los bloques de concreto con cuidado una vez que hayan adquirido la suficiente resistencia inicial.

7.3.5. Curado

Después de desmoldar, colocar los bloques de concreto en un área de curado y rocía agua regularmente sobre ellos durante al menos una semana a 28 días o incluso 90 días como lo recomiendan las investigaciones para lograr un curado adecuado.

7.3.6. Almacenamiento

Almacenar los bloques de concretos curados en un lugar adecuado hasta que estén listos para su uso en la construcción.

7.4. Evaluación de Propiedades

Para evaluar las propiedades de los bloques se propone realizar evaluaciones basadas en la normativa colombiana mediante la determinación de la masa seca, la capacidad de absorción de agua y la resistencia a la compresión.

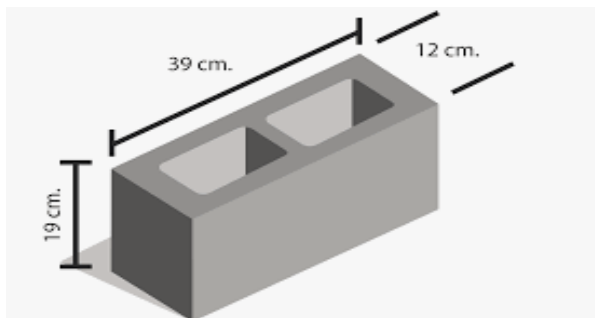
7.4.1. Ensayo de resistencia a la compresión de bloques

Para realizar el ensayo de fuerza de compresión en un ladrillo de hormigón, se pueden seguir los procedimientos descritos en (ASTM, 2008). Primero, se deben seleccionar muestras de ensayo que sean unidades de tamaño normal, a menos que se modifiquen según lo descrito en la normativa. Si las dimensiones de las láminas tanto el espécimen de prueba como el bloque de soporte de la máquina de ensayo son demasiado grandes, se requiere efectuar un corte con una sierra para adecuarlos al tamaño correcto. La muestra resultante no debe presentar protuberancias ni características irregulares y debe estar completamente contenida dentro de una o varias celdas de cuatro lados.

Una vez que se han preparado las muestras de ensayo, se deben colocar en la máquina de ensayo y se deben aplicar cargas de compresión a una velocidad constante. La fuerza de compresión del componente debe considerarse como la fuerza total de la unidad completa. Los resultados del ensayo se deben registrar y se deben informar de acuerdo con los procedimientos requeridos para diferentes edades de curado.

Según lo establecido por la normativa, se puede ilustrar el bloque de concreto a ensayar de la siguiente manera:

Figura 3. Bloque de concreto



Nota: Elaborada por el autor

7.4.2. Ensayo de absorción

Para llevar a cabo esta prueba, es necesario deshidratar las muestras en un horno a temperatura de 230 ± 9 °F (110 ± 5 °C) hasta que alcancen un peso constante. Posteriormente, las muestras deben ser enfriadas a temperatura ambiente y se procede a pesarlas.

Luego de esta etapa, Las muestras deben permanecer sumergidas en agua a temperatura ambiente durante un lapso de 24 horas. Una vez que haya transcurrido este tiempo, se deben extraer las muestras del agua y secarlas con una toalla con el fin de eliminar cualquier exceso de humedad presente en su superficie Posteriormente, las muestras deben ser pesadas con una precisión de 0.1 oz (1 g) (ASTM, 2008).

La absorción se calcula restando la masa sumergida de la masa en estado seco dividida por la masa sumergida, y se expresa como un porcentaje. Los resultados del ensayo se deben registrar y se deben informar de acuerdo con los procedimientos establecidos.

7.4.3. Ensayo de densidad de masa seca

El ensayo de densidad de masa seca en bloques de concreto se lleva a cabo para evaluar la calidad y densidad del material. Primero, se pesan los bloques individualmente en una balanza para obtener su masa húmeda. Luego, los bloques se colocan en un horno de secado a una temperatura de alrededor de 105°C hasta que alcancen una masa constante, indicando que toda la humedad se ha evaporado. Después de enfriarse a temperatura ambiente, se pesan nuevamente para obtener la masa seca. Finalmente, se calcula la densidad de masa seca dividiendo la masa seca del bloque entre su volumen, proporcionando así un valor en kg/m^3 que indica cuánta masa seca hay en un metro cúbico del bloque. Este procedimiento es crucial para verificar que los bloques cumplan con las especificaciones de densidad requeridas en la construcción (ASTM, 2008).

7.4.4. Resultados esperados

Los ensayos deben satisfacer las directrices establecidas anteriormente en las tablas 6 y 7 de este trabajo de investigación, las cuales se fundamentan en las regulaciones colombianas aplicables.

Las pruebas realizadas en diferentes estudios de investigación logran identificar que la aplicabilidad del SSA en el cemento para los bloques de concreto tuvieron un efecto factible y beneficioso en las propiedades del concreto resultante, incluyendo un incremento en la fuerza bajo compresión y una disminución en la capacidad de absorción. Sin embargo, el estudio también encontró que el porcentaje óptimo de SSA a agregar al sistema de cemento variaba según la propiedad específica que se evaluaba. Esto implica que, para la resistencia a la compresión, se encontró que el resultado óptimo de SSA era del 10%, mientras que, para la absorción de agua, el porcentaje óptimo era del 20%. Por lo tanto, la cantidad óptima de SSA a

agregar al sistema de cemento depende de la propiedad específica que se desea mejorar, lo que se traduce también en la aplicabilidad final que se quiera tener en el uso de los bloques fabricados con esta dosificación de concreto (Brotonsa, 2014).

7.5. Análisis de Impacto en la Economía Circular

La propuesta principal de esta metodología implica de manera directa la gestión de residuos, que con su aplicabilidad en la industria de la construcción es un aspecto clave en la economía circular. Específicamente el uso de SSA en esta industria tiene un impacto positivo en la economía circular, ya que permite la reutilización de un subproducto que de otra manera sería desechado.

Integrar SSA en el proceso de elaboración del cemento tiene la capacidad de reducir la cantidad de energía necesaria para su manufactura, en un margen que varía alrededor del 10-15%. De manera similar, cuando el SSA se emplea en la fabricación de ladrillos, es posible alcanzar una notoria disminución en el consumo energético, que se sitúa en el rango del 20% al 30% (Smol, 2015).

En cuanto a los beneficios económicos, el reciclaje y uso de SSA en materiales de construcción puede reducir los costos de eliminación de residuos y limitar la transferencia de cenizas a vertederos, lo que puede ser beneficioso tanto para las empresas productoras de bloques de concreto como para los consumidores.

Es importante tener en cuenta que la producción de bloques de concreto con SSA implica costos asociados como lo son la operación del horno para la producción de SSA, laboratorios para la caracterización de los biosólidos, gestión, logística de materiales, transporte y almacenamiento. Sin embargo, estos costos no representan una variabilidad en el margen de

capacidad de reducción energética y financiera que tiene el uso de SSA en los bloques, puesto que los costos anteriormente nombrados ya han sido tenidos en cuenta para calcular el margen de reducción energético citado en esta investigación.

Para analizar numéricamente el impacto económico de la integración de SSA en la producción de ladrillos de concreto, podemos considerar los ahorros potenciales en costos de energía. Dado que se afirma según el estudio del estado del arte que el uso de SSA puede reducir el consumo energético en el rango del 20% al 30%, podemos tomar el valor promedio del 25% para este cálculo.

Supongamos que el costo total de producción de ladrillos de concreto antes de integrar SSA es de C , y el componente de energía representa una fracción f del costo total. Después de integrar SSA, el costo total de producción disminuirá en un 25% de la parte correspondiente a la energía. Por lo tanto, se podría proponer para calcular el nuevo costo total de producción de bloques de concreto (CPB) se podría obtener a partir de la siguiente fórmula:

$$CPB = C - 0.25 \times f \times C$$

$$CPB = C(1 - 0.25f)$$

Donde:

C = costo total de producción de ladrillos de concreto antes de integrar SSA

F = Fracción del costo por reducción de energía

CPB = Costo de producción de bloques con adición de SSA

Esta ecuación muestra el ahorro potencial en los costos de producción con la fracción del costo por reducción de energía después de la integración de SSA. Para obtener el impacto económico más real, es esencial considerar otros factores de costos dentro de la producción específicamente de bloques, como mano de obra, materias primas, costos de operación, entre otros.

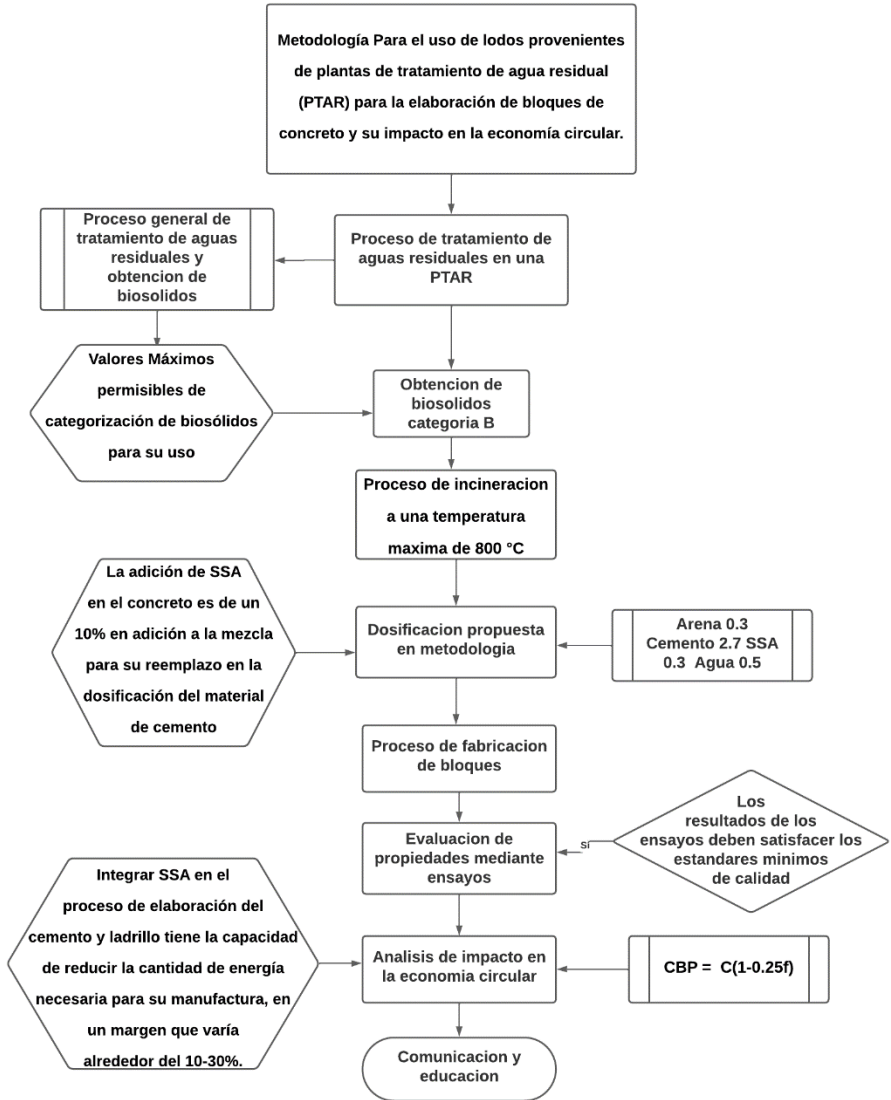
7.6. Comunicación y Educación

Para comunicar los beneficios técnicos, ambientales y económicos de esta metodología, se debe seguir una estrategia efectiva. En primer lugar, identificar e involucrar a las partes interesadas, desde autoridades locales hasta la comunidad en general. Luego, se debe desarrollar un mensaje claro respaldado con datos cuantitativos que destaque el ahorro de costos, la reducción de residuos y el menor impacto ambiental.

Para difundir este mensaje, es importante crear materiales de comunicación atractivos y organizar eventos de divulgación, como seminarios y webinars, donde expertos y personas que hayan implementado la metodología puedan compartir sus experiencias. Colaborar con entidades relevantes, destacar el impacto ambiental y resaltar el ahorro económico también son componentes clave de la estrategia. La presentación de estudios de caso específicos y la recopilación continua de datos y retroalimentación de proyectos reales fortalecerán el mensaje a lo largo del tiempo. Finalmente, mantener canales abiertos de comunicación para abordar inquietudes y preguntas de las partes interesadas ayudará a construir confianza y comprensión en la metodología propuesta.

En la siguiente figura se representa de manera gráfica y resumida la metodología planteada para el uso de lodos provenientes de plantas de tratamiento de agua residual (PTAR) para la elaboración de bloques de concreto y su impacto en la economía circular.

Figura 3. Metodología planteada



Nota: Elaborada por el autor

8. Conclusiones

- Emplear lodos residuales en la creación de bloques de concreto sostenible posee el potencial de generar un impacto considerable al reducir la demanda de recursos naturales y atenuar la producción de residuos en proyectos de construcción de infraestructura. Esta perspectiva claramente exhibe un potencial innegable para la disminución de la huella de carbono en proyectos de construcción, un elemento fundamental en la batalla contra el cambio climático.

- El estudio realizado del caso demuestra que la cantidad de cemento que se puede reemplazar con el uso de SSA en la producción de los bloques, es directamente proporcional con la cantidad de energía requerida para fabricar ese material. Como se explica en la metodología, se propone un uso del 10% de SSA en la dosificación con relación al cemento y a su vez el estudio del caso expone que la reducción de energía que se puede obtener con esta práctica oscila entre el 10% y el 25%. Lo anterior demuestra de manera contundente, que la metodología propuesta tiene un alto impacto ambiental, pues disminuye la producción de las emisiones de gases de efecto invernadero generadas durante el proceso de producción de concreto utilizado en la elaboración de bloques de concreto.

- Es importante resaltar que el estudio del caso demuestra que con una sustitución del 10% de arena por SSA muestra el mejor rendimiento en términos de densidad, absorción y capilaridad. En este caso, se logra una matriz que ocupa los espacios de manera más eficiente gracias al aumento de partículas pequeñas, y su resistencia mecánica mejora significativamente. a la muestra de control y las otras muestras analizadas en este estudio como la muestra de sustitución de cemento. Sin embargo, es clave implementar en mayor medida la sustitución en relación con el cemento pues en primera medida esta mezcla también tiene resultados positivos

en la evaluación de propiedades y, en segundo lugar, como ya se ha dicho, la reducción en la producción de cemento tendría un impacto ambiental mucho más alto.

- Los costos financieros que conllevan los procesos de fabricación de este tipo de bloques puede verse afectado por posibles costos adicionales o inversiones necesarias para la integración de SSA .Sin embargo, en general, una disminución en el costo de producción el cual está ligado al consumo energético del proceso, podría resultar en una mayor rentabilidad para una empresa y en una reducción potencial en el precio de venta, lo que podría aumentar la competitividad en el mercado de la construcción.

- La metodología propuesta puede ser una estrategia clave para mejorar la eficiencia energética en la industria de la construcción. Este estudio demuestra consistentemente que el uso de SSA puede conducir a ahorros significativos de energía en esta aplicación, Lo que refleja una clara aplicación de los principios de la economía circular en cuanto la eficiencia energética.

- La investigación contribuye al conocimiento y promoción de prácticas más responsables y sostenibles. Al demostrar que la utilización de lodos residuales puede ser beneficiosa desde una perspectiva tanto ambiental como económica., se incentiva a la industria a adoptar enfoques más responsables y a cuidar del medio ambiente.

9. Recomendaciones

- Se sugiere llevar a cabo investigaciones adicionales para explorar la aplicabilidad de la metodología en diferentes contextos geográficos y condiciones climáticas. Esto permitiría adaptar la metodología a diversas regiones y maximizar su impacto positivo.
- Es importante colaborar con las autoridades pertinentes para promover la integración de esta metodología en políticas y regulaciones relacionadas con la construcción sostenible.
- Se recomienda proporcionar capacitación y recursos educativos a profesionales de la construcción sobre la implementación efectiva de la metodología. Esto ayudaría a garantizar que se utilice de manera correcta y eficiente en proyectos reales.
- Explorar la posibilidad de establecer incentivos económicos, como créditos fiscales o subvenciones, para las empresas y proyectos que adopten prácticas sostenibles como el uso de lodos de PTAR en la fabricación de bloques de concreto. Esto podría estimular aún más la adopción de esta metodología.

Referencias

- Acosta, D. (2019). Arquitectura y Construcción Sostenible. Recuperado de <https://www.redalyc.org/>.
- Díaz, A. (2015). Tratamiento de lodos, generalidades y aplicaciones. CENIC, pp.12-13.
- ASTM. (2008). ASTM C140 – 08 Métodos de Ensayo Estándar para Muestreo y Ensayo de Unidades de Albañilería de Hormigón y Unidades Relacionadas. ASTM.
- Shi, W. (2021). Sustainable treatment and utilization of sludge: A comprehensive review. *Science of The Total Environment*, pp. 26-32.
- Guerra, S. (2021). Circular economy applications in the construction industry: A global scan of Circular economy applications in the construction industry: A global scan of. ELSEVIER. pp. 14-31.
- Bello, N. (2021). Análisis y propuesta para el uso potencial de biosólidos de PTAR. Análisis y propuesta para el uso potencial de biosólidos de PTAR. Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá D.C.
- . Kinney, E. (2016). Survey of Organic Wastewater Contaminants in Biosolids Destined . *Environ. Sci. Technol.* pp. 4-23.
- Maozhe, C. (2013). Environmental and technical assessments of the potential utilization of sewage sludge ashes (SSAs) as secondary raw materials in construction. ELSEVIER. pp.5 – 27.
- Illankoon, C. (2023). Closing the loop in the construction industry: A systematic literature review on the development of circular economy. ELSEVIER. pp. 4 – 6.

Ceballos, D. (2021). análisis de la viabilidad de la valorización de los biosólidos provenientes de una PTAR urbana, en la fabricación de materiales de construcción. Universidad Católica de Manizales, Manizales.

Brotons, F. (2014). Portland cement systems with addition of sewage sludge ash. Application in concretes for the manufacture of blocks. ELSEVIER. pp. 6 – 34.

INCONTEC. (1997). NTC 4076 unidades de concreto para mampostería no estructural. INCONTEC.

INCONTEC. (1997). NTC 4026 unidades de concreto para mampostería estructural. INCONTEC.

INCONTEC. (2002). NTC 673 Concretos. Método de ensayo de resistencia a la compresión de especímenes de concreto. INCONTEC.

Thomsen, M. (2018). Environmental-Economic Analysis of Integrated Organic Waste and Wastewater Management Systems: A Case Study from Aarhus City (Denmark). Sustainability. pp. 3 – 9.

Cyr, M. (2007). Technological and environmental behavior of sewage sludge ash (SSA) in cement-based materials. ELSEVIER. pp. 8 – 16.

Smol, M. (2015). The possible use of sewage sludge ash (SSA) in the construction. ELSEVIER. pp. 13-27.

Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2014). DECRETO 1287 DE 2014. Bogotá D.C.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). resolución 0631.

MINAMBIENTE. Bogotá D.C.

Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial. (2010). NSR -10 TITULO D-MAMPOSTERIA ESTRUCTURAL. Bogotá D.C.

Ministro de ambiente y desarrollo sostenible. (2019). Estrategia Nacional de economía circular. El futuro es de todos. Bogotá D.C.

Moreno, W. (2021). la economía circular en la industria de la construcción: alternativa para el manejo y disposición de biosólido de plantas de tratamiento de aguas residuales. caso de estudio PTAR el salitre – Bogotá D.C Tunja.

Wanare, R. (2022). Application of biosolids in civil engineering: State of the art. ELSEVIER. pp. 11-19.