



Análisis y propuesta para el uso potencial de biosólidos de PTAR en la fabricación de ladrillos de arcilla

Trabajo de grado presentado por
NÉSTOR EDUARDO GARCÍA BELLO
como requisito parcial para optar al título de
MAGISTER EN INGENIERÍA CIVIL

UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA
FACULTAD DE INGENIERÍA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL

Bogotá D.C., Colombia

2021

Análisis y propuesta para el uso potencial de biosólidos de PTAR en la fabricación de ladrillos de arcilla

NÉSTOR EDUARDO GARCÍA BELLO

APROBADO:

Juan Manuel González Guzmán
Tutor

Diego Palma Cuero
Firma

Leonardo Augusto Fonseca
Firma

Bogotá D.C. diciembre de 2021.

Tabla de Contenido

RESUMEN	VIII
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Planteamiento del problema	3
1.2 Justificación	3
1.3 Objetivos	4
1.3.1 Objetivo General.....	4
1.3.2 Objetivos Específicos.....	4
1.3.3 Alcance	4
2 ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE	6
2.1 Antecedentes	6
2.2 Estado del arte	10
3 MARCO DE REFERENCIA	13
3.1 Marco conceptual	13
3.2 Marco teórico	17
3.3 Marco legal	18
4 (METODOLOGÍA/DESARROLLO/MATERIALES Y MÉTODOS/DISEÑO EXPERIMENTAL).....	21
4.1 Desarrollo del objetivo No. 1	21

4.2	Desarrollo del objetivo No. 2	22
4.3	Desarrollo del objetivo No. 3	23
5	ANÁLISIS	24
5.1	Impactos medios en las bases de datos	24
5.2	Identificación del proceso de fabricación de ladrillos	28
5.3	Matriz de Debilidades Oportunidades Fortalezas y Amenazas – DOFA	28
5.4	Análisis de Ciclo de Vida – ACV	39
5.5	Análisis de características de las materias primas	40
6	ELABORACIÓN DE LOS LADRILLOS Y ENSAYOS	43
6.1	Determinación de las adiciones en las muestras	43
6.2	Elaboración de los ladrillos	45
6.3	Ensayos	46
6.3.1	Absorción de agua	48
6.3.2	Resistencia a la compresión	51
7	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	54
	BIBLIOGRAFÍA	57

Lista de Tablas

Tabla 1 Antecedentes	11
Tabla 2 Marco legal.....	19
Tabla 3 artículos relacionados entre ladrillos e impactos medios	24
Tabla 4 Artículos relacionados impactos medios y biosólidos	25
Tabla 5 Artículos leídos	27
Tabla 7 Matriz DOFA.....	29
Tabla 6 Tamaños de las partículas de los biosólidos de la PTAR UMNG – Cajicá y la arcilla de la ladrillera El Oasis.	41
Tabla 8 Unidades fabricadas	44
Tabla 9 Propiedades físicas mampostería no estructural	47
Tabla 10 Resistencia mínima a la compresión mampostería estructural	47
Tabla 11 Absorción máxima mampostería estructural.....	48
Tabla 12 Peso seco	49
Tabla 13 Absorción	50
Tabla 14 Resistencia a la compresión	52

Lista de Ilustraciones

Ilustración 1 partes de los alcantarillados sanitarios y pluvial en el palacio de Knossos; Fuente:(Lofrano & Brown, 2010)	7
Ilustración 2 Patente uso de lodos en la fabricación de ladrillos; Fuente: (Slim & Wakefield, 1991)	9
Ilustración 3 Línea convencional de tratamiento de agua y lodos; Fuente (Collivignarelli, Canato, et al., 2019).....	18
Ilustración 4 Proceso de una revisión sistemática de literatura; Fuente: (Xiao & Watson, 2019).....	21
Ilustración 5 Etapas del ACV ISO 14044(Balaguera et al., 2018).....	22
Ilustración 6 Número de artículos en la búsqueda de impactos medios; Fuente: Propia	26
Ilustración 7 Análisis de Ciclo de Vida – ACV; Fuente: Propia	40
Ilustración 8 Incorporación de los biosólidos en el ciclo de vida de los ladrillos de arcilla; Fuente: Propia	42
Ilustración 9 Porcentajes de las mezclas; Fuente: Propia.....	45
Ilustración 10 Elaboración de ladrillos; Fuente: Propia.....	46
Ilustración 11 Grafico peso seco respecto a % de biosólidos; Fuente: Propia	49
Ilustración 12 Gráfico % de absorción de agua respecto % de adición de biosólidos; Fuente: Propia.....	51
Ilustración 13 Grafico resistencia a la compresión (MPa) respecto al % de biosólidos; Fuente: Propia ..	53

Lista de Fotos

Foto 1 Biosólidos.....	433
Foto 2 Biosólidos.....	433

Resumen

El presente trabajo tiene como finalidad hacer un análisis ambiental en torno a la posible utilización de biosólidos generados en las PTAR, como alternativa en la fabricación de ladrillos de arcilla.

En primera instancia, se realizó una revisión de literatura sistemática, utilizando las bases de datos disponibles en la universidad, analizando los distintos impactos ambientales que podría tener la alternativa de la adición de biosólidos en la fabricación de ladrillos de arcilla y se realizaron algunas visitas a ladrilleras cercanas a la ciudad de Bogotá D.C., identificando el proceso productivo de la zona donde se pudo observar que se utiliza principalmente hornos tipo colmena, alimentados por carbón mineral.

Con esta información se realizó una matriz DOFA, evidenciando los elementos internos y externos que influyen en la producción de ladrillos de cerámica de forma convencional y los ladrillos con adición de biosólidos, al igual que se identificó los impactos medios y finales de las etapas de la fabricación de los ladrillos, desde la extracción de las materias primas, hasta su disposición como RCD, pasando por la trituración de la arcilla, la mezcla, la cocción, la extrusión el transporte y venta de los ladrillos, al igual que en las etapas de la generación y disposición de los biosólidos.

Por último, se fabricaron 40 ladrillos, divididos en grupos de 10 para realizar los ensayos de resistencia a la compresión y absorción en donde se varió el porcentaje de biosólido añadido de tal forma que se tuvo las mezclas con 0% para los ladrillos de control, 5%, 10% y 15%, los ladrillos con cualquiera de las mezclas cumplen con los parámetros físicos estipulados en la norma colombiana para mampostería no estructural.

Palabras clave: Biosólidos, ladrillos, PTAR, sostenibilidad

Abstract

The purpose of this work is to carry out an environmental analysis around the possible use of biosolids generated in the WWTPs, as an alternative in the manufacture of clay bricks.

In the first instance, a systematic literature review was carried out, using the university's databases, analyzing the different environmental impacts that the alternative of adding biosolids in the manufacture of clay bricks could have, and some visits to brickyards were made. near the city of Bogotá D.C., identifying the productive process of the area where it was observed that mainly beehive-type furnaces are used, fed by mineral coal.

With this information, a SWOT matrix was made, showing the internal and external elements that influence the ceramic bricks in a conventional way and the bricks with the addition of biosolids, as well as the middle and final impacts of the manufacturing stages. of the bricks, from the extraction of the raw materials, to their disposal as RCD, through the crushing of the clay, the mixing, the firing, the extrusion, the transport and sale of the bricks, as in the stages of the generation and disposal of biosolids.

Finally, 40 bricks were manufactured, divided into groups of 10 to carry out the compression resistance and absorption tests where the percentage of added biosolids was varied in such a way that the mixtures were 0% for the control bricks, 5%, 10%. and 15%, the bricks with any of the mixtures comply with the physical parameters stipulated in the Colombian standard for non-structural masonry.

Keywords: Biosolids, bricks, WWTP, sustainability

1 Introducción

El desarrollo de la humanidad ha ido de la mano con el crecimiento y creación de nuevas industrias tales como construcción, minería, química, textil, transporte entre otras, siendo estos pilares para el desarrollo económico, el crecimiento del Producto Interno Bruto - PIB, creación de empleos y mejoramiento del estilo de vida de las personas en una nación. Sin embargo, estas industrias también generan impactos en la salud humana, el medio ambiente y la economía, como el cambio climático, la reducción y contaminación de los recursos naturales, aparición de nuevas enfermedades e inestabilidad económica (Khan et al., 2019).

Uno de los recursos más demandados en la industria en general, y específicamente en Colombia es el agua, del cual se estipulan los siguientes usos principales: “consumo humano y doméstico, preservación de flora y fauna, agrícola, pecuario, recreativo, industrial, estético, pesca, maricultura y acuicultura, navegación y transporte acuático” (Ministerio de ambiente vivienda y desarrollo territorial, 2010). Cada uno de estos usos, genera contaminación en el agua, problema que se ha convertido en una fuente importante de preocupación y una prioridad tanto para la sociedad como para las autoridades públicas, pero más importante aún, para todo el mundo industrializado (Crini & Lichtfouse, 2019).

La principal herramienta para contrarrestar este problema son las Plantas de Tratamiento de Agua Residual - PTAR, las cuales, a pesar de ser una herramienta eficaz para mejorar la calidad del agua residual, generan gran cantidad de lodos húmedos, llegando a generar cantidades del orden de 240 millones de toneladas húmedas, a nivel mundial (Faleschini et al., 2016).

La fracción orgánica de los lodos producidos en las PTAR es sometida a un proceso de estabilización, lo que genera como resultante un subproducto con características físicas, químicas y microbiológicas que permiten su uso, una vez estabilizado como biosólido, dentro de unos rangos según características propias del mismo (Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio, 2014a). Los procesos de estabilización comunes incluyen: degradación aeróbica y anaeróbica, compostaje, estabilización alcalina, secado térmico, fijación puzolánica termofílica, oxidación / desinfección ácida, tratamiento térmico / digestión ácida comúnmente (Çİmen et al., 2014).

Anteriormente los biosólidos eran considerados residuos, debido a eso no contaban con ninguna clase de aprovechamiento y eran dispuestos en rellenos sanitarios, o en los acuíferos, conllevando a impactos ambientales, económicos y sociales; sin embargo, en los últimos años se

Análisis y propuesta para el uso potencial de biosólidos de PTAR en la fabricación de ladrillos de arcilla

han desarrollado investigaciones en torno a ellos, catalogándolos como un subproducto objeto de aprovechamiento. En el caso de Colombia, mediante el decreto 1287 de 2014 del Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio, se reguló el uso de los biosólidos según sus características químicas y microbiológicas.

Actualmente los biosólidos se utilizan en distintas áreas como la agricultura o la rehabilitación de tierras, pero existen muchos países a nivel mundial que no reutilizan y son dispuestos sin utilizar su potencial (Mohajerani et al., 2019).

Otro de los principales contribuyentes a las cargas ambientales es la industria de la construcción, debido a que consumen cantidades significativas de materias primas y recursos no renovables generando considerables cantidades de residuos sólidos. (Faleschini et al., 2016), adicionalmente esta industria consume muchos recursos y energías, (Buyle et al., 2012), y es responsable de aproximadamente el 18% de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), 40% del agotamiento de los recursos naturales y 25% de los residuos en todo el mundo (Teh et al., 2018).

Uno de los productos del sector de la construcción es la fabricación de ladrillos, que para el caso colombiano es uno de los materiales más comúnmente usado. Para el año 2015 se habían reconocido alrededor de 1378 industrias dedicadas a la producción de ladrillos, y cerca de 2430 hornos que tienen como fin la cocción de la arcilla, los cuales se convierten en los actores principales en la emisión de material particulado, generando aproximadamente 3 millones de toneladas anuales de CO₂ (CAEM, 2015).

El aprovechamiento y uso de los residuos sólidos como materia prima secundaria, concepto en el cual los productos, materiales y materias primas prolongan su permanencia tanto como sea posible, es uno de los propósitos de la economía circular, (Ghisellini et al., 2016), el cual tiene como fin mitigar el impacto generado por su disposición.

Buscando mitigar los impactos ambientales generados por distintas industrias entre las cuales se encuentra la industria de la construcción, se establecieron metas con el protocolo de Kioto, el acuerdo de Paris y los objetivos y metas de desarrollo sostenible para el año 2030 establecidos por la ONU de las cuales los objetivos que se encuentran alineados con esta investigación son:

- Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos
- Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles
- Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos

Debido a lo anterior, esta propuesta de investigación propone el uso de biosólidos de la PTAR para su reutilización en la producción de ladrillos de arcilla, reemplazando un porcentaje

Análisis y propuesta para el uso potencial de biosólidos de PTAR en la fabricación de ladrillos de arcilla

de arcilla por biosólidos, y de esta manera, disminuir los impactos generados por estos subproductos y reutilizarlos de manera sostenible.

1.1 Planteamiento del problema

Las PTAR tienen como subproducto principal, los lodos secundarios provenientes del reactor biológico, los cuales actualmente se utilizan en parte para la producción de vermicompost a través de lombrices rojas californianas, sin embargo, este uso es limitado por lo cual se genera la necesidad de encontrar otros métodos de aprovechamiento con el fin de mitigar las afectaciones ambientales producidas por los métodos utilizados para eliminarlos.

El uso de los biosólidos para fabricar materiales de construcción es una alternativa de aprovechamiento para este producto, en este caso este trabajo se enfocará en la fabricación de ladrillos con el fin de evaluar la mitigación de las afectaciones a los recursos naturales producidas a partir de la eliminación temprana de los biosólidos de PTAR, reutilizándolos en el ciclo productivo de la mampostería, conformando una economía circular.

Además, los ladrillos cerámicos son uno de los materiales de construcción más usados a nivel nacional e internacional y el impacto generado durante sus distintas etapas de producción (extracción de materia prima, transporte y cocción) además de su disposición final, son elementos clave que motivan e incentivan a realizar un cambio en la utilización de la materia prima para la fabricación de los ladrillos.

1.2 Justificación

Este trabajo tiene como finalidad evaluar la mitigación del impacto ambiental generada por el aprovechamiento de los biosólidos generados en las PTAR al usarlo como adición en ladrillos.

Actualmente los biosólidos tienen un uso amplio en la agricultura y recuperación del suelo, no obstante, gran parte de estos se siguen disponiendo, afectando el medio ambiente. De otra parte, la constante excavación de arcilla por parte de las ladrilleras representa una explotación de un recurso no renovable (Abbas Mohajerani, 2019), de los cuales la producción anual de 1.500 mil millones de ladrillos requiere a nivel mundial más de 3.13 mil millones de metros cúbicos de arcilla, la adición de biosólidos en la fabricación de ladrillos brindaría una alternativa de mitigación ambiental en el ámbito de la construcción y el tratamiento de agua residual.

Análisis y propuesta para el uso potencial de biosólidos de PTAR en la fabricación de ladrillos de arcilla

En la región de Bogotá D.C. y Cundinamarca la producción regional del sector ladrillero para el año 2013 fue de 184.704 ton/mes, sin embargo, es de resaltar el aumento que tuvo esta producción hacia el año 2015, alcanzando la cifra de 284.056 ton/mes en la misma región, mostrando un aumento del 65% en tan solo 2 años; es importante aclarar que la mayoría (53%) de los hornos para cocción de ladrillos son hornos de fuego dormido, estos son hornos artesanales que utilizan como principal combustible carbón y leña (CAEM, 2015).

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Proponer el uso potencial de biosólidos de PTAR en la fabricación de ladrillos de arcilla de manera ambiental y normativamente viable.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Identificar los principales parámetros que contribuyen a proponer el uso potencial de los biosólidos de PTAR en la producción de ladrillos cerámicos.
- Analizar las fortalezas oportunidades, debilidades y amenazas encontrados, para la fabricación de los ladrillos con adición de Biosólidos y los que no.
- Verificar la resistencia de los ladrillos con adición de biosólidos frente a los ladrillos tradicionales.

1.3.3 Alcance

El enfoque de la investigación es mixto, ya que tendrá información secundaria partiendo de la normativa vigente y los procesos necesarios para la producción de ladrillos de arcilla con y sin adición de biosólidos de PTAR, al igual que la metodología que se utilizará para realizar la investigación, de esto se partirá para conformar la matriz DOFA y el ACV.

Se tendrá un análisis cuantitativo respecto a los resultados que indiquen las encuestas que se les realizaran a distintas ladrilleras

Análisis y propuesta para el uso potencial de biosólidos de PTAR en la fabricación de ladrillos de arcilla

El tipo de investigación será comparativa ya que se realizará, con el fin de comparar los impactos ambientales que generan los ladrillos convencionales, frente a los ladrillos con adición de biosólido

2 Antecedentes y Estado del Arte

2.1 Antecedentes

El ser humano durante su historia se preocupó ocasionalmente por los patógenos transmitidos a través del agua contaminada, no obstante, la aversión de las personas hacia el agua de mal sabor, olorosa y de aspecto desagradable es algo que debe haberse desarrollado durante la evolución biológica y cultural de la humanidad (Vuorinen et al., 2007). Según (Lofrano & Brown, 2010) Civilizaciones orientales fueron las primeras en implementar sistemas de alcantarillado residual, sin embargo, los Romanos perfeccionaron estos sistemas, proporcionando redes duales para recolectar agua de manantial y eliminar las aguas pluviales y residuales (ilustración 01).

Un hito fue el Octavo informe (1912) de la Comisión Real de Eliminación de Aguas Residuales que introdujo el concepto de demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y estableció estándares y pruebas para ser aplicadas a las aguas residuales y efluentes, sin embargo, la primera y segunda guerra mundial retrasaron el desarrollo de los tratamientos en las aguas residuales (Lofrano & Brown, 2010)

Actualmente hay gran diversidad de tecnologías y herramientas enfocadas en el saneamiento de las aguas residuales. Las tecnologías para el saneamiento, se dividen principalmente en dos enfoques, estos son los procesos aerobios y los procesos anaerobios los cuales se caracterizan por el tipo de microorganismos que se encargan de eliminar la materia orgánica, el caudal a tratar, la calidad del agua y los costos son algunos de los criterios para la selección de la alternativa (Limón, 2013)

El principal subproducto del tratamiento de aguas residuales son los lodos, esto debido a su gran volumen de generación en comparación con los demás subproductos y de su tratamiento posterior requerido, estos vienen de las etapas de tratamiento primario y secundario de las PTAR, las características y volúmenes de los lodos producidos dependen del proceso en el cual se hayan generado (Limón, 2013)

Análisis y propuesta para el uso potencial de biosólidos de PTAR en la fabricación de ladrillos de arcilla



Ilustración 1 partes de los alcantarillados sanitarios y pluvial en el palacio de Knossos;
Fuente:(Lofrano & Brown, 2010)

Inicialmente para poder dar una gestión adecuada a los biosólidos, fue necesario implementar políticas de uso y disposición, de febrero de 1993, se promulgaron las normas federales para el uso o eliminación de los biosólidos (Título 40 del Código de Regulaciones Federales [CFR], Parte 503) (USEPA, 1994), en Colombia no fue hasta el año 2014 que se estipuló el decreto 1287 de 2014 “por el cual se establecen criterios para el uso de los biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales” (Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio, 2014b)

El uso de lodos en la fabricación de productos cerámicos y otros materiales de construcción se remonta al año 1889 y a un hombre llamado Thomas Shaw, quien tenía una patente para dicho proceso (Shaw, 1889) (Imagen 02) esta patente consistía en una pasta plástica que surgía a partir de la mezcla de lodo y arcilla en iguales proporciones, otras 2 patentes en donde se incluía lodo en la fabricación de ladrillos fueron creadas por la compañía Lingl en Alemania en el año 1975 (Lingl, 1975) y en el año 1978 en estados unidos (Lingl, 1978).

N° 12,623



A.D. 1889

Date of Application, 10th Aug., 1889—Accepted, 2nd Nov., 1889

COMPLETE SPECIFICATION.

Improvements in Utilizing the Waste Product from Sewage Works for the Manufacture of Bricks, Tiles, Quarries, Building Blocks, Slabs, and the like.

I THOMAS SHAW of No. 46 Mode Wheel Road, Weaste near Manchester in the County of Lancaster Engineer do hereby declare the nature of this invention and in what manner the same is to be performed, to be particularly described and ascertained in and by the following statement:—

5 The object of this invention is to utilize the sludge, sediment or waste product from the precipitating tanks of sewage works, to form bricks tiles, quarries, slabs, blocks or other similar solid forms for building and other purposes.

The sewage as pumped up or otherwise taken in a liquid state from the sewers is ordinarily mixed with lime and other ingredients and is left to settle in the precipitating tanks; the solid refuse matter settles to the bottom of the tanks in the form of sludge and the supernatant clear liquid (comparatively pure water) is allowed to flow away either back again into the sewers or into a brook, river, or other water course, being limpid, inodorous, and otherwise innocuous.

10 The precipitated sludge has to be removed from the tanks from time to time and hitherto it has been considered as a valueless waste product, the accumulation of which has been a great drawback to the adoption of the precipitating system at sewage works.

This waste product or sludge contains various ingredients more or less valuable, and I have discovered that by mixing the said refuse with common clay a plastic composition may be obtained which possesses valuable properties and is capable of being moulded into the shape of bricks, tiles slabs, blocks or other similar solid forms, and after drying and burning in the ordinary manner is suitable for utilization for building and other purposes.

20 According to my invention I take the sludge or refuse from the sewage precipitating tanks and I add thereto about an equal quantity of common clay, and these ingredients I mix well together by means of any suitable machine such for instance as an ordinary pug mill.

The material if too wet is then semi-dried and afterwards forced into or through dies in the ordinary manner of making bricks tiles slabs or similar articles from clay or other plastic materials; which when subsequently dried and burnt in the usual manner will be found to possess valuable qualities such as hardness durability and color far superior to ordinary bricks and other articles made from clay alone, and may be used with advantage in place of the latter for building and for a variety of other useful purposes as a substitute for ordinary clay.

35 Having now particularly described and ascertained the nature of my said invention and in what manner the same is to be performed I declare that what I claim is:—

The utilization of the sludge or waste product, from the precipitating tanks of sewage works, by mixing therewith about an equal quantity of clay and forming from the mixture or plastic composition thus obtained bricks, tiles, slabs, blocks or other similar articles which when dried and burnt are suitable for building and other useful purposes.

Dated this 9th day of August 1889.

GEORGE DAVIES,

45

4, St. Ann's Square, Manchester, Agent for the Applicant.

Análisis y propuesta para el uso potencial de biosólidos de PTAR en la fabricación de ladrillos de arcilla

Ilustración 2 Patente uso de lodos en la fabricación de ladrillos; Fuente: (Slim & Wakefield, 1991)

En la planta de fabricación de ladrillos y tejas Algoa en Sudáfrica, se fabricaban ladrillos con lodos generados en la PTAR de Fishwater Flats en Puerto Elizabeth, (Slim & Wakefield, 1991) describe los procesos empleados en la fabricación de estos ladrillos, su calidad y los considerables beneficios tanto para el fabricante de ladrillos como para la autoridad local.

En el año 1996 en la Universidad Politécnica de Cataluña se investigó un nuevo elemento denominado ECOBRICK, un ladrillo compuesto por lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales urbanas junto con otros residuos y arcillas, para producir un nuevo material cerámico apto para la construcción, reduciendo el consumo de energía hasta en un 49% (J.A.Cusidó et al., 1996)

La investigación de Nagaharu Okuno y Shiro Takahashi en el año 1997 en Japón, en donde se utilizó la ceniza del lodo de depuradora, pasando por un proceso de mezclado entre la ceniza y ladrillos pulverizados producidos anteriormente y que no cumplieron con las especificaciones, un moldeado a 100Mpa, una cocción a 1000°C y una adición de repelente de humedad (Nagaharu Okuno & Takahashi, 1997), aunque los ladrillos fueron ampliamente aceptados para su uso en obras públicas, como pasos peatonales, estos se vieron afectados por el crecimiento de musgo debido a su alto contenido de material orgánico y a su ruptura debido a procesos de lixiviación, igualmente aun no eran muy competitivos por su costo de producción el cual rondaba los 2 dólares y su venta al público en 1 dólar.

En el mismo año, Bernd Wiebusch y Carl Franz Seyfried en Alemania, realizaron una investigación acerca del uso de las cenizas de depuradora de lodos, en la industria de ladrillos y tejas, introduciendo el concepto de los efectos que causan la composición química de las cenizas en las características cerámicas de los ladrillos (Wiebusch & Seyfried, 1997).

En el año 1999 Krogsmann presenta una revisión de literatura en torno a la gestión de los biosólidos, contemplando el uso de los mismos en la fabricación de ladrillos (Krogmann et al., 1999)

En el año 2000 Okuno y Yamada, describieron a partir de 10 años de experiencia, con tres tecnologías distintas para minimizar la cantidad de lodos para disposición final y reutilización potencial, teniendo en cuenta parámetros como la disminución del volumen, ausencia de fugas de metales pesados y que fuese un producto comerciable, las tres alternativas fueron, agregados ligeros artificiales, escoria, fabricación de ladrillos y materia prima para la fabricación de cemento portland, los ladrillos fueron la mejor alternativa económicamente hablando, sin embargo fue la que mayor cantidad de generación de CO₂ represento (N. Okuno & Yamada, 2000)

(Balgaranova et al., 2003) Determina que es posible combinar 10% de lodos generados en la PTAR de Sofia con hasta el 10% en masa de desechos de la planta de coque Kremikovtsi y

Análisis y propuesta para el uso potencial de biosólidos de PTAR en la fabricación de ladrillos de arcilla

arcilla en la fabricación de ladrillos aumentando la plasticidad, contracción, porosidad y aislamiento térmico en el producto terminado con relación al ladrillo convencional.

En el año 2004 Nagaharu Okuno continuo con la investigación del uso de lodos en materiales de construcción incluyendo la investigación de nuevos procesos como la carbonatación de los lodos con alto contenido de humedad (N. Okuno et al., 2004).

2.2 Estado del arte

El aprovechamiento de los biosólidos en distintos campos es un tema de investigación relativamente reciente, esto muestra que la legislación que regula el uso de los biosólidos en distintos países no es anterior al siglo XXI, en Estados Unidos la norma que regula el uso y disposición de los biosólidos es la EPA 40 CFR part 503 del año 2003, en nuestro país es el decreto 1287 del año 2014.

Los biosólidos principalmente se disponen en extensas zonas, generando un gran impacto ambiental, y su principal aprovechamiento es su uso en la fabricación de compostaje, según (Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio, 2014a) los biosólidos se pueden ser aprovechados de distintas maneras, una de ellas es el uso F de la categoría B “Como insumo en la fabricación de materiales de construcción.”.

Tradicionalmente los biosólidos se disponen en rellenos, en el mar o se incineran (Silvana Torri, 2017), sin embargo, en los últimos años el desarrollo de la investigación en torno al aprovechamiento de los biosólidos se ha visto en crecimiento, debido a la implementación de legislaciones ambientales que regulan su disposición.

A continuación, se muestra una tabla con algunos estudios desarrollados en los últimos años, que son referentes al tema en concreto.

Análisis y propuesta para el uso potencial de biosólidos de PTAR en la fabricación de ladrillos de arcilla

Tabla 1 Antecedentes

Tipo de aprovechamiento	Resultados más relevantes	Referencia
Aplicación al suelo	La planta estudiada mostro un mejor desarrollo al plantarse en una mezcla de biosólidos 50% y suelo 50%	(Santacoloma-Londoño et al., 2020)
Adición a ladrillos de arcilla	Incluir biosólidos en la mezcla de la arcilla, tiene implicaciones en las propiedades de los ladrillos como el aumento de la porosidad de los elementos cerámicos y aumento en la resistencia a la compresión	(Mozo & Gomez, 2016)
Adición a ladrillos de arcilla	Los ladrillos con Biosólidos ensayados en este estudio demostraron que se podía disminuir el consumo de hasta un 25% de energía durante la cocción de los ladrillos en una mufla eléctrica debido a su contenido de materia orgánica, la resistencia a la compresión se encontró dentro de los márgenes admitidos en la normativa australiana	(Ukwatta et al., 2015)
Adición a ladrillos de arcilla	Este estudio demostró que existe una relación inversa entre la resistencia a la compresión y el porcentaje de biosólidos adicionado a la mezcla de los ladrillos, sin embargo, cumplieron con los requisitos en resistencia a la compresión con ladrillos más livianos	(Ukwatta & Mohajerani, 2017a)
Adición a ladrillos de arcilla	La resistencia a la compresión y la densidad de los ladrillos cocidos disminuyeron a medida que aumentaba el contenido orgánico en la mezcla. La tasa inicial de absorción, absorción de agua y pérdida de masa por ignición aumentó linealmente con el contenido orgánico en aumento en las mezclas de ladrillos.	(Ukwatta & Mohajerani, 2017b)
Aplicación al suelo	Las enmiendas del suelo con biosólidos mejoraron el éxito en la restauración de los suelos, especialmente con los biosólidos compostados.	(Valdecantos & Fuentes, 2018)
Aplicación al suelo	El uso de los biosólidos en la aplicación al suelo promueve la acumulación de micro plásticos produciendo efectos perjudiciales sobre los organismos del suelo y aumenta la acumulación de otros micro contaminantes, como los metales pesados, poniendo en riesgo los ecosistemas y la salud humana	(Mohajerani & Karabatak, 2020)

Fuente: Propia

Análisis y propuesta para el uso potencial de biosólidos de PTAR en la fabricación de ladrillos de arcilla

Según el (Castillo et al., 2019) “para el año 2018 la cobertura nacional para el servicio público de alcantarillado es del 82,84% para el área urbana y de 14,36% para el área rural”, lo cual evidencia la falta de alcantarillado en el área rural, pero también evidencia el potencial que hay en el país en cuanto a la generación de Biosólidos y su uso en áreas rurales.

3 Marco de Referencia

3.1 Marco conceptual

Con el fin de abarcar los temas tratados en este trabajo de grado, es necesario conocer los siguientes conceptos:

Aguas Residuales: son aquellas que surgen del producto de la actividad humana al utilizar agua en algún proceso, se consideran residuales ya que no se deben utilizar para uso directo debido a su contenido de patógenos, metales pesados y químicos. Estas deben ser tratadas ya que son un riesgo para la salud humana y el medio ambiente.

Características del agua residual: las características que definen un agua residual, se pueden dividir en 3 clases, físicas, químicas y biológicas, teniendo una relación estrecha entre estas (Zaragoza, 2010), para caracterizar las aguas residuales, es necesario identificar los parámetros físico-químicos y biológicos de interés, la procedencia o actividad que genera estas aguas y las normas de calidad vigentes (Molina et al., 1999).

Físicas:

Temperatura: la temperatura de las aguas residuales es un parámetro bastante importante, ya que tiene un efecto sobre el tratamiento biológico, la vida acuática y la idoneidad del agua para distintos usos, básicamente el cambio en la temperatura del agua puede provocar cambios en las especies de biota que existen en el cuerpo del agua, la solubilidad del oxígeno en el agua, el cambio en el proceso de adsorción de oxígeno, la tasa de actividad de los microorganismos entre otros (Alisawi, 2020).

Color: el color en las aguas residuales es uno de los parámetros del agua residual más fácilmente percibidos por las personas, el principal efecto del color en el agua es la reducción de la penetración de la radiación luminosa en el agua, lo que altera la actividad fotosintética y a su vez el equilibrio natural de flora y fauna (Collivignarelli, Abbà, et al., 2019).

Olor: el olor es un parámetro físico producto de las interacciones fisiológicas que dependen de la impresión o asociación de experiencias previas de cada persona (Coa et al., 2019).

Análisis y propuesta para el uso potencial de biosólidos de PTAR en la fabricación de ladrillos de arcilla

Alcantarillado: Un sistema de alcantarillado o sistema de recolección de aguas residuales, consiste en una red de tuberías, estaciones bombeo y demás accesorios, que conducen las aguas residuales desde los puntos de origen hasta un punto de tratamiento y disposición (*Wastewater Treatment - Sewerage Systems / Britannica*, n.d.).

Alcantarillado combinado: El sistema de alcantarillado combinado, está diseñado para recolectar y transportar, las aguas de escorrentía, domésticas e industriales mediante el mismo sistema de tuberías (US EPA, n.d.).

Alcantarillado Separado: Consiste en la recolección de las aguas residuales (Alcantarillado sanitario) y las aguas producto de las escorrentías superficiales (Alcantarillado pluvial), este sistema se utiliza principalmente con el fin de evitar posibles desbordamientos en el sistema de alcantarillado cuando se producen eventos de lluvias con alta intensidad, igualmente, evita la mezcla entre el agua residual de tipo domiciliario en este caso y el agua de escorrentía, que es menos contaminada por microbianos y químicos disminuyendo los costos en los procesos de saneamiento, por ultimo proporciona una mayor efectividad de tratamientos en cuanto a sedimentación (Giraldo Gómez, 2000)(*Separate Sewers / SSWM - Find Tools for Sustainable Sanitation and Water Management!*, n.d.).

PTAR: (Planta de tratamiento de aguas residuales) es un conjunto de obras, instalaciones y procesos que se utilizan para tratar aguas residuales.

Lodos de aguas residuales: es un subproducto de los procesos llevados a cabo para eliminar las cargas contaminantes de las aguas residuales, son una mejora en cuanto a la calidad del agua ya que disminuyen su proliferación de vectores, enfermedades, compuestos orgánicos persistentes y patógenos en concentraciones nocivas para la salud pública y el medio ambiente, pueden contener contaminantes tóxicos, fenoles y metales pesados. (Kansaon & De, 2019)

Biosólido: es el resultado de la estabilización de los lodos generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales, que se estabiliza con el fin de obtener características físicas, químicas y microbiológicas, aptas para su uso en distintos campos (Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio, 2014b)

Arcillas: es una roca sedimentaria creada a partir de partículas pequeñas producto de la meteorización de otras rocas y minerales. (*Clay - Rock Types Found in the British Isles - GCSE Geography Revision - BBC Bitesize*, n.d.)

son una de las más importantes materias primas usadas en la fabricación de productos cerámicos (Milošević & Logar, 2017), dependiendo de su composición y otras características técnicas, la arcilla se procesa en diferentes formas donde sus propiedades

Análisis y propuesta para el uso potencial de biosólidos de PTAR en la fabricación de ladrillos de arcilla

mecánicas varían. En la industria se suele identificar principalmente la granulometría y composición de la arcilla (Mousharraf et al., 2012)

Según la NTC 4051 la arcilla, es un material compuesto de distintos minerales, en mayor proporción de silicatos hidratados de aluminio, que tiene la propiedad de adquirir plasticidad al hacer contacto con el agua y tomar consistencia al ir perdiendo humedad, igualmente adquiere características y propiedades pétreas como un aumento en la resistencia, cuando se lleva a altas temperaturas (Norma Técnica Colombiana, 2005).

Explotación: la explotación de las arcillas es toda actividad que tienen como objeto o hacen parte de la extracción del mineral, incluyendo su acopio, beneficio y cierre y abandono (Congreso de Colombia, 2001).

Propiedades de la arcilla

Porosidad: la porosidad de un sólido, es la fracción del volumen del material que es ocupada por vacíos (Charles Fitts, 2012), de esta forma la porosidad se puede expresar como el volumen de vacíos sobre el volumen total del sólido.

Plasticidad: la plasticidad se refiere a que tan flexible es un material, para el caso de la arcilla esta aumenta su plasticidad con la adición de agua, sin embargo, la absorción y retención del agua, puede provocar una mayor contracción en el momento de la cocción del ladrillo lo que puede generar grietas y disminuir la resistencia del material.

Absorción: es la capacidad de un material de llenar sus poros con sustancias líquidas o gaseosas.

Color: para el caso de las arcillas el color depende de la oxidación del hierro presente.

Secado: es el proceso que se genera al contacto con el aire, en donde se reduce el contenido de humedad del elemento de tal forma que depende de las condiciones climáticas y de la altura a la que se encuentre, es importante cuidar esta etapa del proceso ya que un secado rápido puede generar poros grandes en el elemento y disminución de la resistencia y un secado incompleto puede generar problemas en la cocción

Cocción: una vez los elementos se encuentran secos, se somete a distintos procesos de cocción dentro del horno, variando la temperatura de tal forma que se adquiera la resistencia a altas temperaturas por encima de los 1000°C

Análisis y propuesta para el uso potencial de biosólidos de PTAR en la fabricación de ladrillos de arcilla

Contracción: existen muchos materiales que reducen su volumen debido a la reducción de la humedad producto del secado, por lo que es un fenómeno muy común en los materiales que requieren agua para su fabricación, como es el caso de la arcilla, la reducción del volumen comúnmente acarrea problemas como, la formación de grietas, deformaciones, cambios en la calidad del producto, entre otras (Hasatani et al., 1993).

Ladrillo: es el principal material de construcción, es fabricado a partir de arcilla, actualmente es utilizado en pilares y construcciones estáticamente tensas (Fiala et al., 2019)

Procesos de la fabricación de los ladrillos: el proceso productivo de ladrillos de arcilla en la región de Cundinamarca suele constar de una extracción en la mina o cantera, aireación y maduración, acopio en tolvas, zaranda, molienda, humectación y mezcla, extrusión y corte, secado, cocción y por último la comercialización

Extracción en la mina: la materia prima utilizada, la arcilla, es extraída por medio de maquinaria pesada, principalmente una retroexcavadora, un bulldozer y un cargador, llevando a cabo extracción a cielo abierto por medio de terraceo realizando primero una adecuación del suelo en cuanto a posibles aprovechamientos y afectaciones ambientales, tras esto se realiza un descapote, retirando la capa vegetal que cubre el suelo, luego se realiza la extracción por terraceo, adaptando taludes para que resistan las cargas del paso de la maquinaria y por último se realiza la conformación de los taludes finales, que suelen tener alturas de 5 (cinco) metros y ángulos de 45°, la extracción suele hacerse conforme el paso de varios años, dependiendo las reservas de material y capacidad productiva de la planta, una vez la arcilla sale de la mina, se transporta a los acopios de maduración

Trituración: Aunque la arcilla tiene un tamaño de grano inferior o igual a 2 micrómetros (Nysdec, n.d.), suele encontrarse en conglomerados de gran tamaño, por lo que su permeabilidad es una de las más bajas (Tiab & Donaldson, 2016), lo cual dificulta la humectación efectiva y moldeo de la arcilla.

Igualmente, para evitar defectos como el agrietado de los ladrillos, se muele chamote y se mezcla con la arcilla, esta molienda, genera la emisión de material particulado, por lo que los molinos deberán controlar dicha emisión, luego se muele la arcilla a través de un molino de martillos, dejando un tamaño de conglomerado inferior a 1 milímetro, facilitando así la humectación. Por último, la arcilla se transporta a través de una banda y se acopia en una tolva

Humectación y mezcla: una vez se muele la arcilla, se transporta hacia la maquina mezcladora, donde la arcilla es humectada y mezclada de manera homogénea.

Análisis y propuesta para el uso potencial de biosólidos de PTAR en la fabricación de ladrillos de arcilla

Extrusión y corte: la arcilla se humedece, se mezcla y se homogeniza, pasando a la extrusora, pasando la arcilla a través de un molde, cuando sale por el molde el material es cortado según las medidas del ladrillo que se va a elaborar.

Secado Natural: El producto se lleva a patios de secado cubiertos, donde la humedad se retira por aire, como ya se expresó anteriormente, este es un proceso dependiente altamente de las condiciones de temperatura, presión y humedad relativa.

Cocción del ladrillo: el material moldeado se lleva al horno, en donde se eleva la temperatura entre 800 y 900°C, cambiando la estructura molecular de las arcillas para darle sus propiedades mecánicas, en la región de estudio, se suele utilizar como combustible carbón mineral, descargando gases a través de la chimenea.

Comercialización; una vez cocido, el material se deja enfriar y luego se retira del horno para posteriormente acopiarse en patios hasta que sea vendido.

3.2 Marco teórico

Después del agua residual tratada los biosólidos son el principal producto del tratamiento de aguas residuales, este producto requiere ser cuantificado ya que es un riesgo para la salud humana y el medio ambiente, por lo tanto, es necesario conocer su cantidad de producción y aprovechamiento, el Eurostat provee de información relacionada con la producción y aprovechamiento de los biosólidos a nivel Europa.

Los biosólidos son el producto de la estabilización de los lodos secundarios de las PTAR, de acuerdo con el tamaño de la planta, los lodos producidos en el tratamiento de las aguas residuales pueden ser llevados a una línea de tratamiento adicional llamada tratamiento de lodos (ilustración 3), los objetivos de esos tratamientos son reducir el contenido de humedad y estabilizar la materia orgánica (Collivignarelli, Canato, et al., 2019)

Análisis y propuesta para el uso potencial de biosólidos de PTAR en la fabricación de ladrillos de arcilla

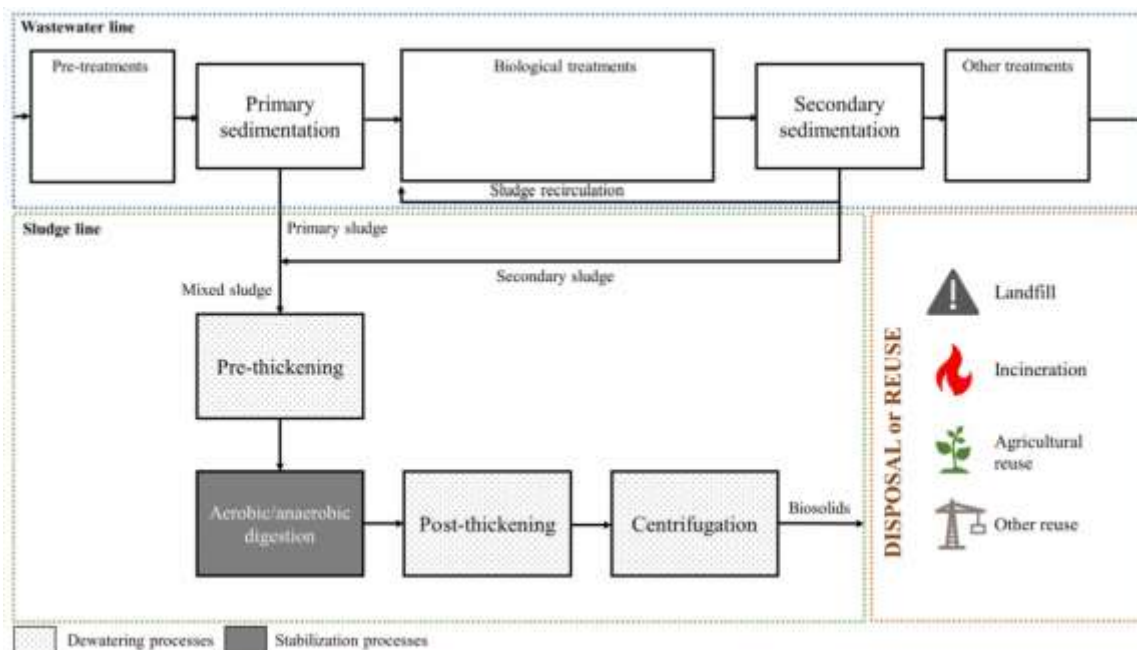


Ilustración 3 Línea convencional de tratamiento de agua y lodos; Fuente (Collivignarelli, Canato, et al., 2019)

Dentro de la información proporcionada por Eurostat, se evidencian 2 cosas significativas en la evolución del manejo de los biosólidos, la primera es que el porcentaje de biosólidos dispuestos en vertederos ha disminuido, la segunda es que se ha diversificado el uso de los biosólidos, y ya no solo se aplican al suelo para la agricultura, sino que se ha optado por otros usos, donde el más común es su aplicación al suelo.

3.3 Marco legal

Para el caso en Colombia la norma que regula el uso de los biosólidos en distintas áreas es el decreto 1287 expedido en el año 2014 por el ministerio de vivienda, ciudad y territorio "Por el cual se establecen criterios para el uso de los biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales"

Para determinar las características de ladrillos de cerámica se siguen los ensayos expuestos en la NTC 4205.

Análisis y propuesta para el uso potencial de biosólidos de PTAR en la fabricación de ladrillos de arcilla

Tabla 2 Marco legal

CONSTITUCION POLITICA DE 1991	
ARTICULOS	CONTENIDO
Artículos 1, 7 y 8	Indican los principios fundamentales del país, aclarando que es un estado con interés general y que es responsabilidad conjunta entre las personas y el estado, proteger la riqueza natural de la nación
Artículos 79 y 80	El estado velara por la protección de los recursos naturales, garantizando el desarrollo sostenible, para que sus habitantes puedan gozar de un ambiente sano
Artículo 95 numeral 8	Todo habitante del territorio nacional debe proteger los recursos naturales del país y velar por la conservación de un ambiente sano.

NORMAS	
NORMA	CONTENIDO
“Decreto Ley 2811 de 1974”	“Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente.”
“Ley 09 de 1979 (Congreso de Colombia).”	Dicta medidas sanitarias en torno a distintos temas, para el caso de este documento se tendrá en cuenta, lo relacionado a los vertimientos y emisiones atmosféricas
“Ley 99 de 1993”	A partir de esta ley se da estructura al “sistema nacional ambiental, se crea el Ministerio de Ambiente”, igualmente da un primer acercamiento al ordenamiento territorial.
CONPES No 3383-2005	Da indicadores de estado del sistema de saneamiento en el territorio nacional, al igual que las metas, estrategias y el plan de acción de la nación en cuanto al desarrollo de estos sistemas
“Ley 685 de 2001 y su modificatoria Ley 1382 de 2010”	Es la máxima norma de la minería en Colombia, se tiene en cuenta para efectos de la extracción de arcilla dentro del proceso de fabricación de los ladrillos

Análisis y propuesta para el uso potencial de biosólidos de PTAR en la fabricación de ladrillos de arcilla

NORMAS	
NORMA	CONTENIDO
Decreto 3930 de 2010	Indica el manejo y la reglamentación en torno a los vertimientos. Estipulando sus prohibiciones, parámetros de calidad y permisos necesarios para su disposición.
Resolución 2734 de 2010	Es un instrumento que tiene como fin actualizar el método mediante el cual se logra la aceptación a nivel nacional de proyectos de mitigación en el proceso de emisión de gases de efecto invernadero GEI, optando por el Mecanismo de Desarrollo Limpio MDL
Decreto 1287 de 2014	Este decreto, da las pautas a nivel nacional para el uso de los biosólidos, estableciendo criterios para sus distintos usos y valores máximos de cargas contaminantes.
Decreto 1076 de 2015	Decreto compilatorio, en torno a las normas que rigen e, sector ambiente.

Fuente: Propia

4 (Metodología/Desarrollo/Materiales Y Métodos/Diseño Experimental)

4.1 Desarrollo del objetivo No. 1

Para el desarrollo de este objetivo se realizó una revisión de literatura sistemática, se utilizaron principalmente las bases de datos de la Universidad Militar Nueva Granada, en donde se aseguró que las fuentes fuesen revistas catalogadas como Q1 o Q2, la revisión de literatura siguió un ciclo sistemático en donde se utilizó la metodología expuesta por (Xiao & Watson, 2019)

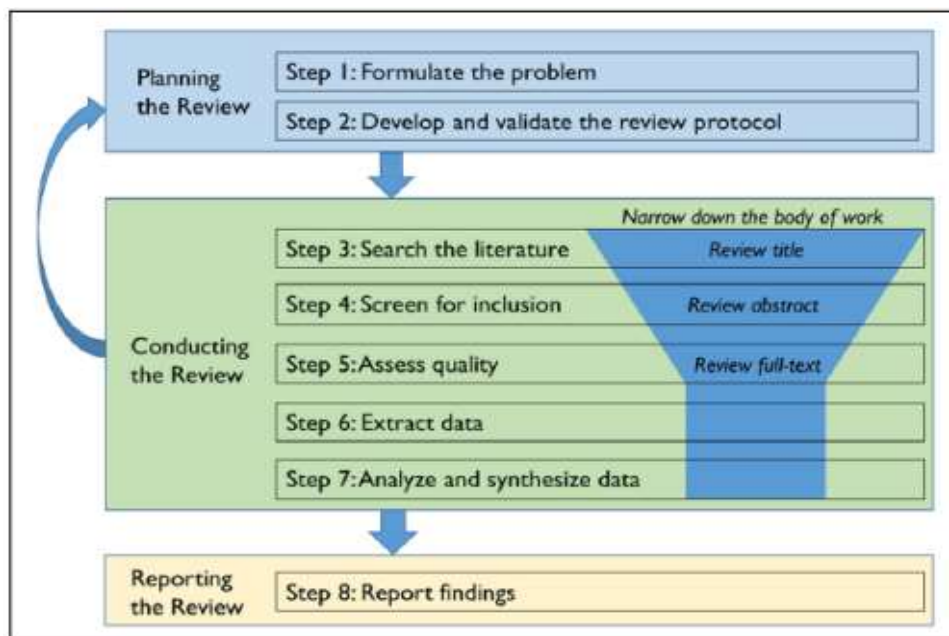


Ilustración 4 Proceso de una revisión sistemática de literatura; Fuente: (Xiao & Watson, 2019)

Análisis y propuesta para el uso potencial de biosólidos de PTAR en la fabricación de ladrillos de arcilla

Identificando los artículos que hablan de biosólidos o ladrillos de arcilla e incluyeran algún impacto medio.

Del mismo modo, se realizó visitas a algunas ladrilleras cercanas a la ciudad de Bogotá, con el fin de identificar el proceso productivo en la zona y las actividades que más impactan el medio ambiente y la salud humana dentro de la producción de los ladrillos de arcilla.

4.2 Desarrollo del objetivo No. 2

Para cumplir con el objetivo No. 2 se realizó una matriz DOFA analizando los elementos internos y externos que pueden afectar el proceso de fabricación tanto de los ladrillos de arcilla tradicionales, como los ladrillos de arcilla con adición de biosólidos generados en PTAR, con el fin de extraer estrategias convenientes basadas en sus fortalezas oportunidades debilidades y amenazas.

Igualmente, se plantea un análisis de ciclo de vida ACV, definiendo los procesos que se involucran en las fabricaciones de cada uno de los tipos de ladrillos, junto con sus impactos medios y finales.

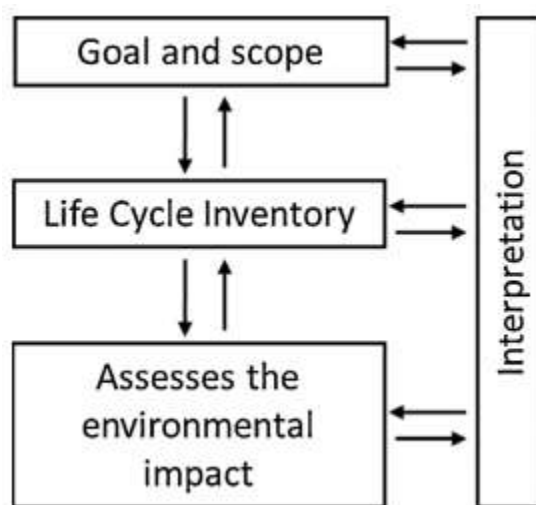


Ilustración 5 Etapas del ACV ISO 14044(Balaguera et al., 2018)

4.3 Desarrollo del objetivo No. 3

Por último, con apoyo de una ladrillera cercana, se coció algunas unidades de ladrillos con distintos porcentajes de adición de biosólido, 0, 5, 10 y 15% siguiendo el proceso productivo típico en la zona, e identificado en el desarrollo del objetivo N°1, una vez se tuvieron los ladrillos, se utilizó la metodología expuesta en la NTC 4017 para los ensayos de las propiedades físicas teniendo en cuenta la NTC 4205-2 donde se estipulan los ensayos para ladrillos de mampostería no estructural, se llevó a cabo el ensayo de resistencia a la compresión de los ladrillos fabricados con arcilla y los ladrillos fabricados con adición de biosólidos en distintos porcentajes, al igual que la absorción de agua verificando el cumplimiento de dichos parámetros físicos para los ladrillos estructurales y no estructurales según la NTC 4205-1 y 4205-2.

5 Análisis

5.1 Impactos medios en las bases de datos

Para realizar el análisis de frecuencia se buscó en 6 reconocidas bases de datos de artículos científicos (ASCE, Science Direct, Scopus, Springer, Web of science, SciELO) los términos “Clay brick” y “Biosolid” con cada uno de los impactos medios descritos en la tabla.

Tabla 3 artículos relacionados entre ladrillos e impactos medios

Artículos impactos medios y ladrillos de arcilla (2016-2020)							
Impactos medios	ASCE	Science direct	Scopus	Springer	Web of science	SciELO	Total
Toxicidad humana	21	1008	4	409	4	0	1446
Ecotoxicidad del agua dulce	1	38	0	17	0	0	56
Eutroficación	9	269	4	138	2	0	422
Calidad del aire	141	2619	15	1936	15	2	4728
Calentamiento global	27	1137	24	661	9	1	1859
Inorgánicos respiratorios	3	176	1	111	1	0	292
Ecotoxicidad terrestre	1	61	0	22	1	0	85
Minerales	134	3578	234	2410	160	1	6517
Combustibles fósiles	76	792	10	479	5	1	1363
Agotamiento de recursos hídricos	29	493	7	341	2	0	872
Ecotoxicidad marina	1	65	0	22	0	0	88
Acidificación	11	445	2	164	2	1	625
Formación de oxidantes fotoquímicos	1	54	0	23	0	0	78
Desgaste de la capa de ozono	4	189	1	78	1	0	273

Fuente: Propia

Análisis y propuesta para el uso potencial de biosólidos de PTAR en la fabricación de ladrillos de arcilla

Tabla 4 Artículos relacionados impactos medios y biosólidos

Artículos impactos medios y biosólidos (2016-2020)							
Impactos medios	ASCE	Science direct	Scopus	Springer	Web of science	SciELO	Total
Toxicidad humana	43	1668	1	153	9	0	1874
Ecotoxicidad del agua dulce	0	103	1	7	0	0	111
Eutroficación	15	432	13	28	3	0	491
Calidad del aire	117	1660	15	246	1	0	2039
Calentamiento global	33	478	6	35	0	0	552
Inorgánicos respiratorios	3	152	1	20	1	0	177
Ecotoxicidad terrestre	1	167	3	18	0	0	189
Minerales	78	1830	72	187	22	1	2190
Combustibles fósiles	77	501	3	44	0	0	625
Agotamiento de recursos hídricos	29	315	1	33	0	0	378
Ecotoxicidad marina	1	117	0	12	0	0	130
Acidificación	22	742	15	205	21	0	1005
Formación de oxidantes fotoquímicos	2	53	0	4	0	0	59
Desgaste de la capa de ozono	6	94	1	8	0	0	109

Fuente: Propia

Análisis y propuesta para el uso potencial de biosólidos de PTAR en la fabricación de ladrillos de arcilla

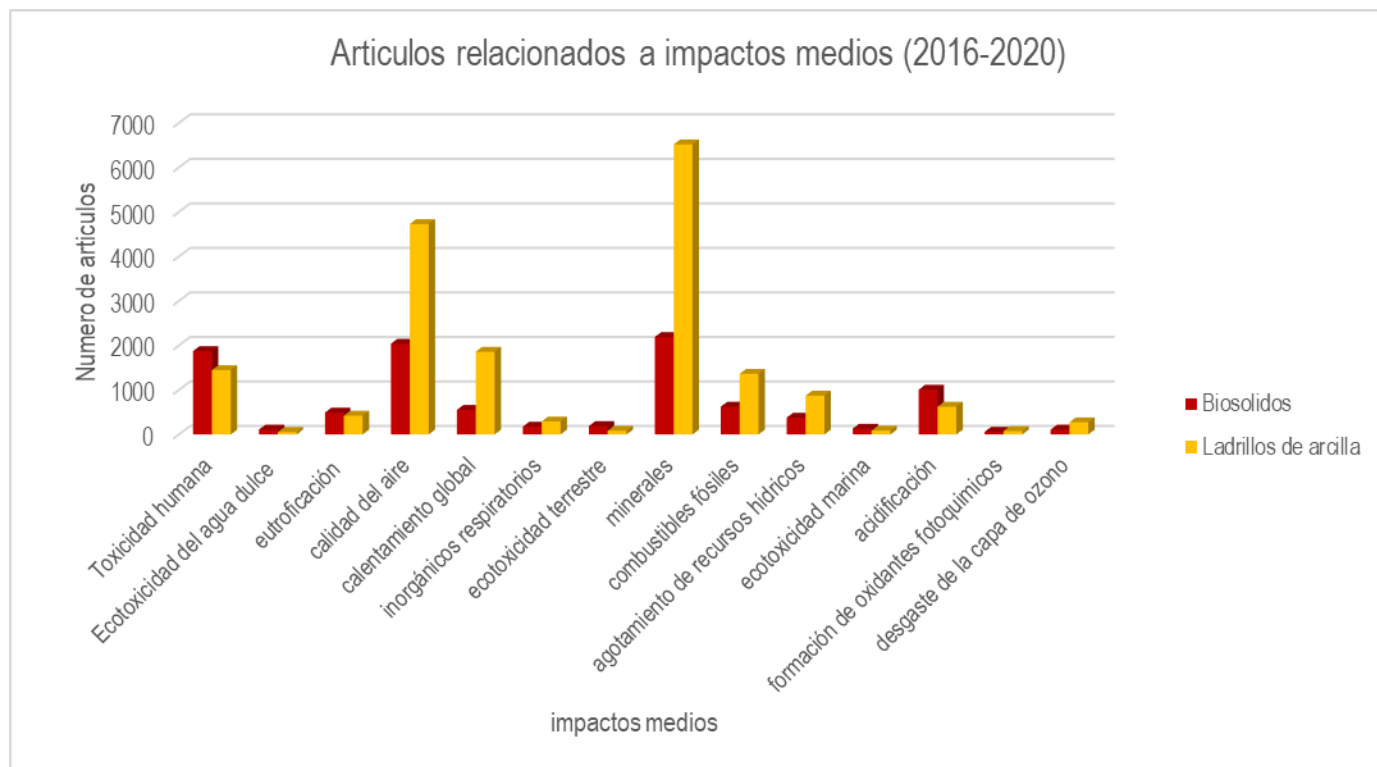


Ilustración 6 Número de artículos en la búsqueda de impactos medios; Fuente: Propia

Análisis y propuesta para el uso potencial de biosólidos de PTAR en la fabricación de ladrillos de arcilla

Tabla 5 Artículos leídos

Artículos leídos Impactos medios respecto a energías								
Impactos medios	Ladrillos de arcilla				Ladrillos con adición de biosólido			
	Títulos leídos	Resúmenes repetidos	Resúmenes leídos	Leídos por completo	Títulos leídos	Resúmenes repetidos	Resúmenes leídos	Leídos por completo
Toxicidad humana	6	1	3	1	8	1	4	1
Ecotoxicidad del agua dulce	2	0	1	0	2	0	1	0
Eutroficación	2	0	1	0	2	0	1	0
Calidad del aire	10	2	5	1	10	2	5	1
Calentamiento global	5	1	2	0	10	2	5	1
Inorgánicos respiratorios	2	0	1	0	2	0	1	0
Ecotoxicidad terrestre	2	0	1	0	2	0	1	0
Minerales	10	3	5	1	10	3	5	1
Combustibles fósiles	10	2	5	1	10	2	5	1
Agotamiento de recursos hídricos	3	0	1	0	6	1	3	1
Ecotoxicidad marina	2	0	1	0	2	0	1	0
Acidificación	3	0	1	0	3	0	1	0
Formación de oxidantes fotoquímicos	2	0	1	0	2	0	1	0
Desgaste de la capa de ozono	2	0	1	0	2	0	1	0

Fuente: Propia

5.2 Identificación del proceso de fabricación de ladrillos

Durante el periodo de elaboración de la investigación, se realizaron visitas a distintas ladrilleras identificando los procesos de fabricación llevados a cabo en ellas.

La primera planta que se visitó, se encuentra ubicada en el municipio de Suesca – Cundinamarca, la cual cuenta con 3 hornos tipo Colmen, dichos hornos cuentan con una única chimenea, los cuales funcionan a base de carbón mineral, en el momento, se informó que dichos hornos tienen una capacidad de 8000 ladrillos cada uno y son encendidos una vez al mes por un periodo de 48 horas, cada una de estas quemas consume alrededor de 4 a 5 toneladas de carbón proveniente del municipio de Lenguaque

En la localidad de Ciudad Bolívar (19), de la ciudad de Bogotá D.C., se visitó una ladrillera que cuenta con horno de baúl, la cual produce 68000 ladrillos por horneada; cada horneada tiene una duración de 85 horas y se realizan 2 horneadas mensuales. Los ladrillos son previamente pasados por la máquina de extrusión, luego son secados en patios de secado.

Según lo informado la producción promedio mensual de ladrillos, es de 213 ton/mes, siendo necesario para esa producción, el consumo de 24,97 ton/mes de carbón mineral, el cual es acopiado en la ladrillera, bajo una cubierta.

En el municipio de Cogua, se visitó una ladrillera que cuenta con 2 hornos tipo colmena que producen 780 ton/mes de ladrillos lo que representa cerca de 105.000 piezas, utilizando cerca de 65 toneladas mensuales de carbón mineral y un horno tipo vagón que produce 840 ton/mes de ladrillos lo que representa cerca de 117.000 piezas, con un consumo de carbón de 160 toneladas por mes, lo que podría indicar una eficiencia más alta en los hornos tipo colmena.

5.3 Matriz de Debilidades Oportunidades Fortalezas y Amenazas – DOFA

Una matriz DOFA es una herramienta que se utiliza para analizar y evaluar los elementos internos que afectan en este caso al ladrillo que son las fortalezas y debilidades y los elementos externos que son las oportunidades y amenazas, para este caso los elementos internos son los recursos utilizados en su fabricación, las propiedades físicas, químicas y mecánicas, entre otras y los elementos externos son el mercado, los recursos de la competencia, entre otros (Sammut-Bonnici & Galea, 2017)

Análisis y propuesta para el uso potencial de biosólidos de PTAR en la fabricación de ladrillos de arcilla

Para la elaboración de la matriz DOFA, se realizó una revisión de literatura, en donde se evaluaron tres aspectos claves de los ladrillos con y sin adición de biosólidos en su fabricación, el primero fue el impacto medioambiental identificando elementos como el consumo de combustible para la cocción del ladrillo y el uso de materias primas no renovables, el segundo aspecto fue sus propiedades físicas y mecánicas, como la resistencia a la compresión y la absorción y el tercero que fue su posible implementación en el sector de la construcción, como la confortabilidad que puede dar al ser un elemento aislante o la facilidad de construcción.

Tabla 6 Matriz DOFA

ladrillos de arcilla		
	Con adición de biosólido de PTAR	Tradicionales
Fortalezas	<p>FB1-El Proceso llevado a cabo una PTAR, consta de las siguientes fases (VALLEJO SANTACRUZ & CASAS GARCÍA, 2018):</p> <ul style="list-style-type: none"> -Captación de agua y pretratamiento. -Medición de caudal -Lodos Activados -Desinfección y descarga -Tratamiento de los lodos <p>de esta forma se garantiza la producción de biosólidos dentro de la planta</p> <p>FB2 - Según (Case et al., 2017) las principales barreras que encuentran los granjeros para utilizar fertilizantes orgánicos en su actividad agropecuaria son: olor desagradable para los vecinos, incertidumbre en el contenido de nutrientes y dificultad en la planificación y el uso</p>	<p>FA1 - La Tasa inicial de absorción es la capacidad de absorción capilar que tienen los ladrillos medida durante 1 minuto (ICONTEC, 2000), según (Ukwatta et al., 2015) la tasa inicial de absorción aumenta al aumentar los porcentajes de biosólidos añadidos esto debido probablemente al aumento en la porosidad de los ladrillos, una tasa de absorción alta es algo no deseable debido a que puede generar daños en el cuerpo cerámico.</p> <p>FA2 - En el caso estudiado por (Ukwatta et al., 2015) La resistencia a compresión de los ladrillos con un contenido de 50% de biosólidos disminuye en un 40% respecto a la resistencia presentada por el blanco.</p>

Análisis y propuesta para el uso potencial de biosólidos de PTAR en la fabricación de ladrillos de arcilla

ladrillos de arcilla	
Con adición de biosólido de PTAR	Tradicionales
<p>FB3 - Incorporar biosólidos en la fabricación de ladrillos puede ahorrar hasta 25% de energía durante la cocción de los ladrillos en hornos eléctricos, debido al poder calorífico que libera la materia orgánica presente en los biosólidos (Ukwatta et al., 2015).</p> <p>FB4 - La adición de biosólidos en la fabricación de ladrillos disminuye su densidad lo que es una ventaja en cuanto a las características de aislamiento térmico (Ukwatta et al., 2015)</p> <p>FB5 - El contenido de carbono orgánico, es un indicador de la concentración de MO y un índice de la calidad del abono orgánico, este debe encontrarse entre 5% y 15% (Norma Técnica Colombiana, 2004), según (Chávez Porras et al., 2017) la muestra que tomo de biosólidos de la PTAR tenía un contenido de 23,87% de carbono orgánico oxidable lo cual no lo hace apto para su uso directo en el suelo.</p> <p>FB6 – Los ladrillos con contenido de biosólidos pierden peso en la cocción y son más ligeros que los ladrillos sin adición de biosólido, esto debido a su contenido de materia orgánica (Ukwatta & Mohajerani, 2017b).</p>	<p>FA3 - Debido a la granulometría presentada por los biosólidos producidos en las PTAR en donde el contenido de arenas es predominante (Chávez Porra et al., 2014), la mezcla de biosólidos con la arcilla para la fabricación de ladrillos, presenta una menor plasticidad en estado húmedo que la que se da en ausencia de biosólidos.</p> <p>FA4- En el estudio realizado por (Ukwatta & Mohajerani, 2017a) los ladrillos con adición de biosólido mostraron una contracción inicial y contracción en la cocción mayor que los ladrillos sin biosólidos. Esto debido a los altos contenidos de humedad y materia orgánica de los biosólidos</p> <p>Los biosólidos de la PTAR cuentan con un contenido de humedad alto, para el caso del estudio realizado por Chávez fue del 75.27% y un contenido de carbono orgánico oxidable de 23.87% (Chávez Porras et al., 2017)</p> <p>FA5 -Al utilizar materiales alternativos para adicionar a la mezcla de los ladrillos, se incurre en gastos de transporte adicionales (Z. Zhang et al., 2018).</p> <p>FA6 – En el análisis de ciclo de vida realizado por (Ukwatta et al., 2018), se encontró que el ladrillo tradicional, presentaba un impacto ambiental menor en el desgaste del agua, con respecto a los ladrillos que incluían porcentajes de biosólidos adicionados a la mezcla.</p>

Análisis y propuesta para el uso potencial de biosólidos de PTAR en la fabricación de ladrillos de arcilla

ladrillos de arcilla	
Con adición de biosólido de PTAR	Tradicionales
<p>FB7 – (Ukwatta et al., 2018) realizó un análisis de ciclo de vida para 4 tipos de ladrillos distintos, Tradicional, con 25% de adición de biosólidos de la planta de tratamiento del este de Melbourne Australia y 2 con 25% de adición de biosólidos con distintas características de la planta de tratamiento del oeste de la misma ciudad, el resultado fue una disminución en los siguientes impactos climáticos, para los ladrillos con adición de biosólidos, en los 3 casos respecto al ladrillo tradicional:</p> <ul style="list-style-type: none"> Cambio climático. Desgaste de la capa de ozono. Acidificación. Toxicidad Humana. <p>FB8 – el consumo de energía específico en los ladrillos con adiciones de biosólidos, es menor que el de los ladrillos tradicionales, en el caso de los ladrillos adicionados con 25% de las plantas de tratamiento del este y oeste de Australia se demostró que el ladrillo tradicional tiene un consumo específico de energía de 35.3 MJ/Kg, siendo este el que más consume, mientras que el ladrillo que menos consumo específico de energía mostro fue el que contenía un 25% de biosólidos de la planta de tratamiento del oeste de Melbourne Australia, con un consumo de energía específico de 16.47 MJ/Kg (Ukwatta et al., 2018)</p>	<p>FA7 – en el análisis de emisiones de gases realizado por (Ukwatta et al., 2018) se encontró que los ladrillos con adiciones de biosólidos muestran concentraciones más altas de CO, CO₂, NO, HCN, SO₂ durante el proceso de cocción.</p>

Análisis y propuesta para el uso potencial de biosólidos de PTAR en la fabricación de ladrillos de arcilla

Análisis y propuesta para el uso potencial de biosólidos de PTAR en la fabricación de ladrillos de arcilla

ladrillos de arcilla		
	Con adición de biosólido de PTAR	Tradicionales
Oportunidades	<p>OB1- El costo del manejo de los biosólidos es de aproximadamente el 50% del costo total de operación de una planta de tratamiento de aguas residuales (Crini & Lichtfouse, 2019).</p> <p>OB2- Según (United Nations, 2015) la población mundial para el 2015 era 7.349 millones de personas y se proyecta un crecimiento poblacional a 8.501 millones de personas en 2030, 9.725 millones en 2050 y 11.213 millones de personas para el año 2100, incrementando así la cantidad de biosólidos generados.</p> <p>OB3 - El uso de biosólidos como material de construcción encaja perfectamente en los supuestos de una economía circular (Neczaj & Grosser, 2018)</p> <p>OB4 - El uso de biosólidos tiene aplicaciones prácticas como medio de reciclaje y desarrollo sostenible en la fabricación de ladrillos (Ukwatta & Mohajerani, 2017a).</p>	<p>OA1 - Según (Ukwatta & Mohajerani, 2017a) no es recomendable la adición de más de 25% de biosólidos en la fabricación de ladrillos, para ladrillos de alta calidad se recomienda disminuir el porcentaje de adición de biosólidos.</p> <p>OA2 – El cambio a una economía circular es aceptado por menos del 10% de la economía mundial, esto está asociado al desajuste entre las políticas nacionales o el liderazgo político deficiente (Fořt & Černý, 2020)</p> <p>OA3 – aunque muchos de los ladrillos estudiados hechos de materiales de desecho como biosólidos, cumplen con los diversos requisitos estándar y se han aprobado varias patentes, la aplicación comercial y uso de estos aún es un reto, ya que los métodos para su producción son poco convencionales, aun no hay normas que indiquen parámetros de evaluación para dichos elementos, el riesgo de contaminación no ha sido estudiado a detalle y la falta de interés por parte de la sociedad en utilizar residuos como materiales de construcción(L. Zhang, 2013).</p> <p>OA4 – aunque se ha investigado con distintos tipos de materiales como aditivos en los ladrillos de arcilla cocidos y existen distintas pruebas a las que son sometidos, la conductividad térmica y respuesta acústica rara vez se informan, aun cuando dichas propiedades son relevantes en cuanto al consumo energético y al confort que puede prestar una construcción. (Muñoz Velasco et al., 2014) se relaciona normalmente la absorción de humedad y la resistencia a la</p>

Análisis y propuesta para el uso potencial de biosólidos de PTAR en la fabricación de ladrillos de arcilla

ladrillos de arcilla	
Con adición de biosólido de PTAR	Tradicionales
<p>OB5 - Los ladrillos cocidos son uno de los tipos de ladrillos más comúnmente usado, sin embargo, consume una considerable cantidad de energía asociado al agotamiento de los recursos (Dabaieh et al., 2020)</p> <p>OB6 – Se ha investigado sobre distintos materiales alternativos en la fabricación de ladrillos, como colillas de cigarrillo (Mohajerani et al., 2016), lodos de la industria del papel (Vieira et al., 2016), vidrio reciclado (Loryuenyong et al., 2009), desechos sólidos de la agricultura (Kizinievič et al., 2018), cenizas de cascara de arroz (De Silva & Perera, 2018), cascara de sagú (Ornam et al., 2017)</p>	<p>compresión, parámetros que suelen ser más elevados en los ladrillos tradicionales.</p>

ladrillos de arcilla	
Con adición de biosólido de PTAR	Tradicionales
<p>DB1 - La legislación colombiana en temas de biosólidos aun no es suficientemente específica en cuanto su uso en el decreto 1287 de 2014, no son suficientemente rigurosos en temas como la aplicación al suelo para la agricultura en donde se permiten contenidos de metales pesados (Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio, 2014b).</p>	<p>DA1 - Incorporar biosólidos en la fabricación de ladrillos puede ahorrar hasta 25% de energía durante la cocción de los ladrillos en hornos eléctricos, debido al poder calorífico que libera la materia orgánica presente en los biosólidos (Ukwatta et al., 2015).</p>

Debilidades

Análisis y propuesta para el uso potencial de biosólidos de PTAR en la fabricación de ladrillos de arcilla

ladrillos de arcilla	
Con adición de biosólido de PTAR	Tradicionales
<p>DB2 - Según (Case et al., 2017) las principales ventajas que encuentran los granjeros en el uso de fertilizantes orgánicos para su actividad agropecuaria son: La mejora de la estructura del suelo, seguida por el bajo costo de compra o producción y la facilidad de disponibilidad</p> <p>DB3 - La Tasa inicial de absorción es la capacidad de absorción capilar que tienen los ladrillos medida durante 1 minuto (ICONTEC, 2000), según (Ukwatta et al., 2015) la tasa inicial de absorción aumenta al aumentar los porcentajes de biosólidos añadidos esto debido probablemente al aumento en la porosidad de los ladrillos, una tasa de absorción alta es algo no deseable debido a que puede generar daños en el cuerpo cerámico.</p> <p>DB4 - En el caso estudiado por (Ukwatta et al., 2015) La resistencia a compresión de los ladrillos con un contenido de 50% de biosólidos disminuye en un 40% respecto a la resistencia presentada por el blanco.</p>	<p>DA2 – Los ladrillos con contenido de biosólidos pierden peso en la cocción y son más ligeros que los ladrillos sin adición de biosólido, esto debido a su contenido de materia orgánica (Ukwatta & Mohajerani, 2017b).</p> <p>DA3- La adición de biosólidos en la fabricación de ladrillos disminuye su densidad lo que es una ventaja en cuanto a las características de aislamiento térmico (Ukwatta et al., 2015)</p> <p>DA4 – (Ukwatta et al., 2018) realizó un análisis de ciclo de vida para 4 tipos de ladrillos distintos, Tradicional, con 25% de adición de biosólidos de la planta de tratamiento del este de Melbourne Australia y 2 con 25% de adición de biosólidos con distintas características de la planta de tratamiento del oeste de la misma ciudad, el resultado fue una disminución en los siguientes impactos climáticos, para los ladrillos con adición de biosólidos, en los 3 casos respecto al ladrillo tradicional:</p> <ul style="list-style-type: none"> Cambio climático. Desgaste de la capa de ozono. Acidificación. Toxicidad Humana.

Análisis y propuesta para el uso potencial de biosólidos de PTAR en la fabricación de ladrillos de arcilla

ladrillos de arcilla	
Con adición de biosólido de PTAR	Tradicionales
<p>DB5 - Debido a la granulometría presentada por los biosólidos producidos en la PTAR, en donde el contenido de arenas es predominante (Chávez Porra et al., 2014), la mezcla de biosólidos con la arcilla para la fabricación de ladrillos, presenta una menor plasticidad en estado húmedo que la que se da en ausencia de biosólidos.</p> <p>DB6 - En el estudio realizado por (Ukwatta & Mohajerani, 2017a) los ladrillos con adición de biosólido mostraron una contracción inicial y contracción en la cocción mayor que los ladrillos sin biosólidos. Esto debido al contenido de materia orgánica y humedad de los biosólidos.</p> <p>Los biosólidos de la PTAR según el estudio realizado por Chávez cuentan con un contenido de humedad del 75.27% y un contenido de carbono orgánico oxidable de 23.87% (Chávez Porras et al., 2017).</p> <p>DB7 – Al utilizar materiales alternativos para adicionar a la mezcla de los ladrillos, se incurre en gastos de transporte adicionales (Z. Zhang et al., 2018),</p> <p>DB8 – En el análisis de ciclo de vida realizado por (Ukwatta et al., 2018), se</p>	<p>DA5 – el consumo de energía específico en los ladrillos con adiciones de biosólidos, es menor que el de los ladrillos tradicionales, en el caso de los ladrillos adicionados con 25% de las plantas de tratamiento del este y oeste de Australia se demostró que el ladrillo tradicional tiene un consumo específico de energía de 35.3 MJ/Kg, siendo este el que más consume, mientras que el ladrillo que menos consumo específico de energía mostro fue el que contenía un 25% de biosólidos de la planta de tratamiento del oeste de Melbourne Australia, con un consumo de energía específico de 16.47 MJ/Kg (Ukwatta et al., 2018)</p>

Análisis y propuesta para el uso potencial de biosólidos de PTAR en la fabricación de ladrillos de arcilla

ladrillos de arcilla	
Con adición de biosólido de PTAR	Tradicionales
<p>encontró que el ladrillo tradicional, presentaba un impacto ambiental menor en el desgaste del agua, con respecto a los ladrillos que incluían porcentajes de biosólidos adicionados a la mezcla.</p> <p>DB9 – en el análisis de emisiones de gases realizado por (Ukwatta et al., 2018) se encontró que los ladrillos con adiciones de biosólidos, muestran concentraciones más altas de CO, CO₂, NO, HCN, SO₂ durante el proceso de cocción.</p>	

ladrillos de arcilla	
Con adición de biosólido de PTAR	Tradicionales
<p>AB1- Otros usos de los biosólidos como los establecidos para las categorías A y B según la legislación colombiana (Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio, 2014b).</p> <p>AB2 - Existe un incremento en el interés de los granjeros por usar fertilizantes derivados de los desechos urbanos (Case et al., 2017).</p> <p>AB3 - Según (Ukwatta & Mohajerani, 2017a) no es recomendable la adición de más de 25% de biosólidos en la fabricación de ladrillos, para ladrillos de alta calidad se recomienda disminuir el porcentaje de adición de biosólidos.</p>	<p>AA1 - El uso de biosólidos tiene aplicaciones prácticas como medio de reciclaje y desarrollo sostenible en la fabricación de ladrillos (Ukwatta & Mohajerani, 2017a).</p> <p>AA2 - Los ladrillos cocidos son uno de los tipos de ladrillos más comúnmente usado, sin embargo, consume una considerable cantidad de energía asociado al agotamiento de los recursos (Dabaieh et al., 2020)</p> <p>AA3 – Se ha investigado sobre distintos materiales alternativos en la fabricación de ladrillos, como colillas de cigarrillo (Mohajerani et al., 2016), lodos de la industria del papel (Vieira et al., 2016), vidrio reciclado (Loryuenyong et al., 2009), desechos sólidos de la agricultura (Kizinievič et al., 2018), cenizas de</p>

Análisis y propuesta para el uso potencial de biosólidos de PTAR en la fabricación de ladrillos de arcilla

ladrillos de arcilla	
Con adición de biosólido de PTAR	Tradicionales
<p>AB4 – El cambio a una economía circular es aceptado por menos del 10% de la economía mundial, esto está asociado al desajuste entre las políticas nacionales o el liderazgo político deficiente (Fořt & Āerný, 2020).</p> <p>AB5 – aunque muchos de los ladrillos estudiados hechos de materiales de desecho como biosólidos, cumplen con los diversos requisitos estándar y se han aprobado varias patentes, la aplicación comercial y uso de estos aún es un reto, ya que los métodos para su producción son poco convencionales, aun no hay normas que indiquen parámetros de evaluación para dichos elementos, el riesgo de contaminación no ha sido estudiado a detalle y la falta de interés por parte de la sociedad en utilizar residuos como materiales de construcción (L. Zhang, 2013).</p> <p>AB6 – aunque se ha investigado con distintos tipos de materiales como aditivos en los ladrillos de arcilla cocidos y existen distintas pruebas a las que son sometidos, la conductividad térmica y respuesta acústica rara vez se informan, teniendo en cuenta que estas propiedades tienen una gran influencia en la comodidad del usuario de la estructura (Muñoz Velasco et al., 2014), se relaciona normalmente la absorción de</p>	<p>casaca de arroz (De Silva & Perera, 2018), casaca de sagú (Ornam et al., 2017)</p>

Análisis y propuesta para el uso potencial de biosólidos de PTAR en la fabricación de ladrillos de arcilla

ladrillos de arcilla	
Con adición de biosólido de PTAR humedad y la resistencia a la compresión, parámetros que suelen ser más elevados en los ladrillos tradicionales.	Tradicionales

Fuente: Propia

5.4 Análisis de Ciclo de Vida – ACV

El análisis de ciclo de vida es una herramienta que permite tomar decisiones en cuanto a temas de sostenibilidad teniendo en cuenta todo un panorama general, pudiendo así contemplar escenarios en distintos contextos económicos, políticos, industriales e incluso individuales, teniendo en cuenta siempre los impactos medioambientales que dichas actividades puedan acarrear.

Se realizó un análisis de ciclo de vida conceptual, donde se definió como objetivo identificar los procesos e impactos más significativos en la producción tanto de ladrillos de arcilla como de ladrillos de arcilla con adición de biosólidos.

Análisis y propuesta para el uso potencial de biosólidos de PTAR en la fabricación de ladrillos de arcilla

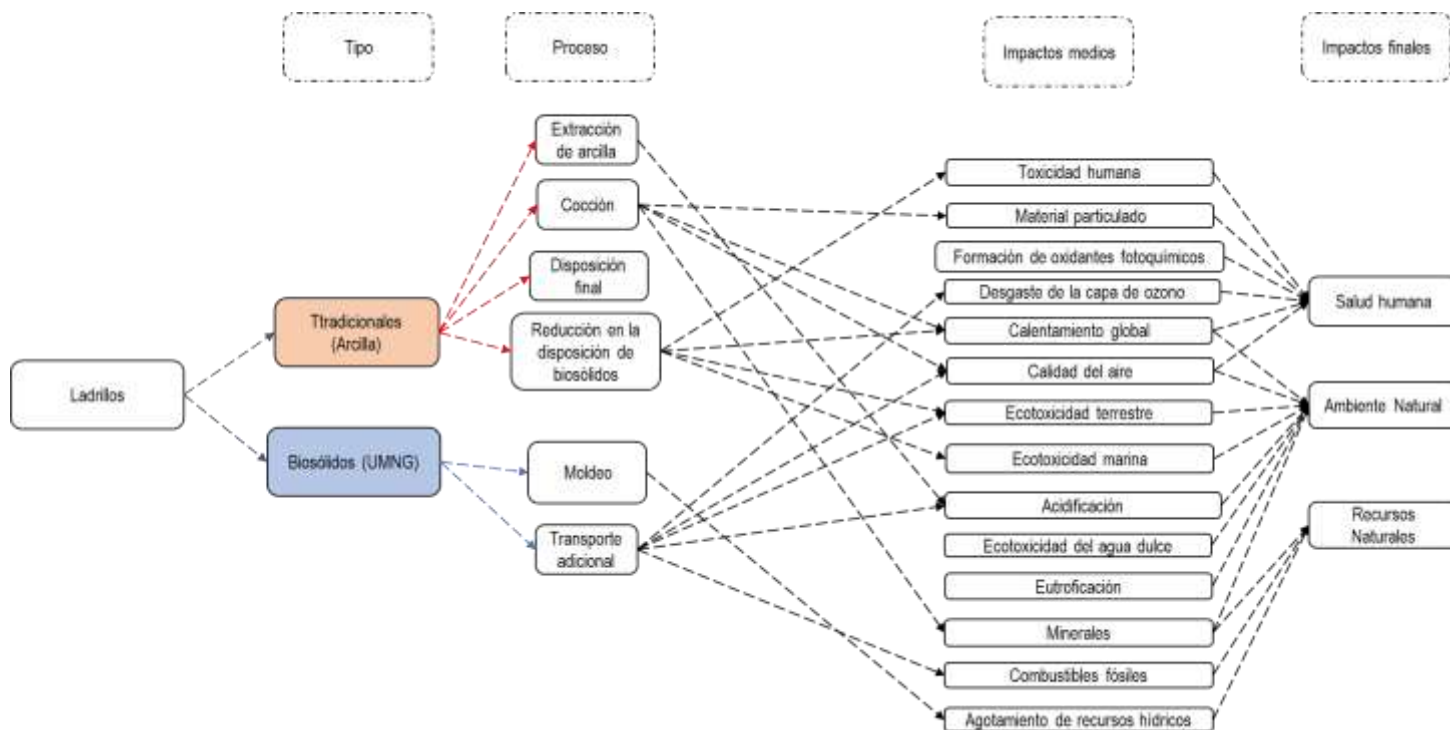


Ilustración 7 Análisis de Ciclo de Vida – ACV; Fuente: Propia

Teniendo en cuenta el análisis de ciclo de vida elaborado, se pudo identificar que para la fabricación de ladrillos el proceso más significativo fueron la cocción, debido a que la adición de los biosólidos permite una disminución en la necesidad de energía para cocer los ladrillos, para el caso de los ladrillos que contienen adición de biosólidos, el impacto más significativo fue el transporte adicional.

5.5 Análisis de características de las materias primas

A través de la revisión de literatura, se pudo adquirir información de las características físicas y químicas de los lodos y los biosólidos de la PTAR de la UMNG – Cajicá. Dentro de las características físicas más relevantes para la fabricación de ladrillos esta la granulometría, en donde los porcentajes de la fracción fina de los biosólidos de la PTAR de la UMNG – Cajicá, se obtuvieron de (Chávez Porra et al., 2014) y se compararon con características de la arcilla de la planta de la compañía “El Oasis”, evaluadas previamente por (Mozo & Gomez, 2016), esta distribución se determinó mediante el método del análisis granulométrico por medio del hidrómetro (Instituto Nacional De Vias, 2014).

Análisis y propuesta para el uso potencial de biosólidos de PTAR en la fabricación de ladrillos de arcilla

Tabla 7 Tamaños de las partículas de los biosólidos de la PTAR UMNG – Cajicá y la arcilla de la ladrillera El Oasis.

Tamaño de partículas			Acilla para ladrillo
Propiedad	Unidad	Biosólido	
Arenas	%	51.8	28
Limos	%	35.6	32
Arcillas	%	9.6	40

Fuente: Propia, adaptado de (Chávez Porra et al., 2014) y (Mozo & Gomez, 2016)

La materia prima utilizada para la fabricación de los ladrillos, en la planta de producción El Oasis, cuenta con una composición predominante de arcillas proporcionando a este material de una alta plasticidad en condiciones húmedas, mientras, que en el caso de los biosólidos producidos en la PTAR de la UMNG – Cajicá, las arenas son el tamaño de partículas más abundante, lo cual puede llegar a traducirse en una pérdida de plasticidad en los ladrillos que tengan adiciones de biosólidos.

Los ladrillos producidos con adición de biosólidos de PTAR siguieron el siguiente proceso dentro de su fabricación (Ilustración 7).

Análisis y propuesta para el uso potencial de biosólidos de PTAR en la fabricación de ladrillos de arcilla

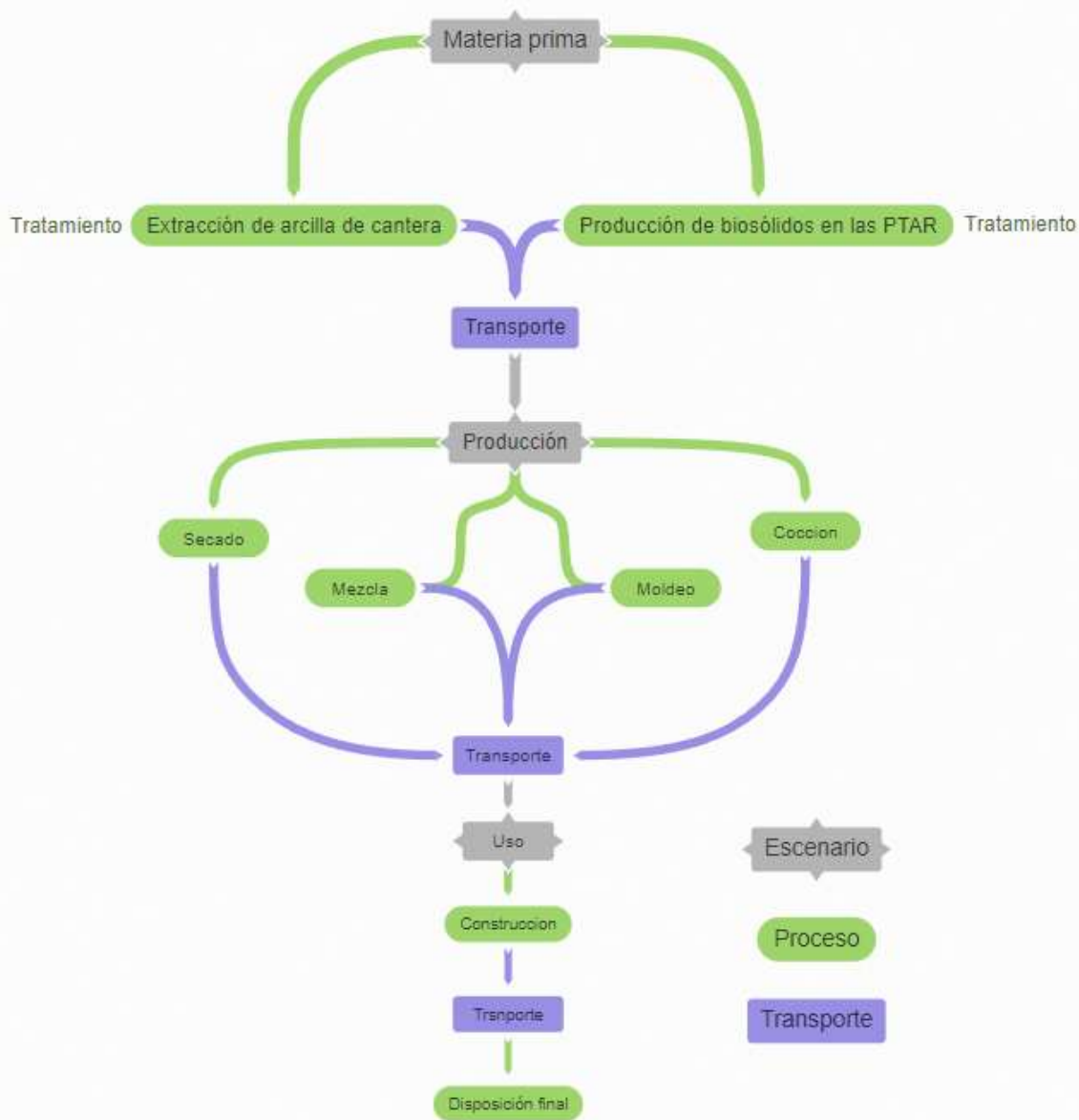


Ilustración 8 Incorporación de los biosólidos en el ciclo de vida de los ladrillos de arcilla; Fuente: Propia

6 Elaboración de los ladrillos y ensayos

6.1 Determinación de las adiciones en las muestras

Los biosólidos utilizados fueron biosólidos generados por la EMPRESA MUNICIPAL DE ACUEDUCTO ALCANTARILLADO Y ASEO DE FUNZA EMAAF ESP (Foto 1 y 2).



Foto 1 Biosólidos



Foto 2 Biosólidos

Fuente: Propia

Se definieron los porcentajes de adición de los biosólidos teniendo en cuenta la literatura donde los porcentajes óptimos para la elaboración de los ladrillos es de 5 a 10% por lo que se seleccionó los siguientes porcentajes, 0% de adición para los ladrillos de control los cuales sirvieron para identificar las propiedades físicas y mecánicas de los ladrillos sin contenido de biosólidos (Control), y en proporciones de 5, 10 y 15% para ladrillos con adición de biosólidos, los biosólidos fueron secados en horno a 105°C por 24 horas antes de realizar la adición a la arcilla.

Para determinar el número de muestras que se fabricaron se tuvo en cuenta lo estipulado en la NTC 4017 (ICONTEC, 2005), donde se toman 10 muestras, por cada uno de los lotes, 5 de estas son utilizadas en ensayos de resistencia a la compresión y las otras 5 en los ensayos de absorción, fabricando las unidades expuestas en la tabla 8.

Análisis y propuesta para el uso potencial de biosólidos de PTAR en la fabricación de ladrillos de arcilla

Tabla 8 Unidades fabricadas

Mezcla	Porcentaje de adición en la Mezcla	Cantidad de unidades	Peso por unidad	Peso total
#	%	U	Kg	Kg
1	0	10	4	40
2	5	10	4	40
3	10	10	4	40
4	15	10	4	40

Fuente: Propia



Análisis y propuesta para el uso potencial de biosólidos de PTAR en la fabricación de ladrillos de arcilla

Ilustración 9 Porcentajes de las mezclas; Fuente: Propia

6.2 Elaboración de los ladrillos

La arcilla utilizada para la mezcla se explota cada tres meses y la cantidad que se almacena es de 1000 m³/mes, sacando una producción para 8 días mediante la conformación de terrazas. El sistema de explotación actual está definido por minería a cielo abierto, mediante la conformación de terrazas, teniendo en cuenta el diseño minero y sus datos geométricos, geotécnicos, operativos y ambientales.

Para la mezcla de la arcilla, se depositan capas horizontales de ente 0.5m y 0.8m, con un largo máximo de 60 m y un ancho de 30 m formando el lecho de homogenización y envejecimiento. Esto permite el suministro a la planta de material homogéneo y principalmente en lo que se refiere a la plasticidad y contenido de humedad. De esta manera se mezclan los diferentes tipos de arcilla cortados durante el proceso con lo cual se logra unificar las características en lo referente a textura, humedad y composición evitando sobre tamaños y reduciendo así el porcentaje de humedad, entre otros. La pila formada tendrá una altura mínima de 5 m para garantizar el mayor número de capas, obteniendo así mayor homogenización.

la pila de arcilla se almacena durante un periodo mínimo de 3 meses, de tal forma que se aumenta la plasticidad de la pasta cerámica y se disminuye la tendencia a la fisuración. Los cambios de temperatura ocurridos durante la maduración ayudan a que las partículas de arcilla se separen los terrones, logrando así un mejor comportamiento en el moldeo. Tras esto, la arcilla es transportada a un molino de martillos donde se tritura y se mezcla con agua, aproximadamente 1 litro de agua por cada 8 kg de arcilla, manejando un contenido de humedad de aproximadamente 5%

Tras la mezcla y maduración de la arcilla, se realizó la adición del biosólido, cada dosificación, se dispuso en un recipiente, donde fue mezclada, hasta conseguir una consistencia uniforme y fue almacenado en bolsas plásticas por 24 horas luego, se colocó el material en moldes de 20 cm de largo X 10 cm de alto X 6 cm de ancho, evitando la contaminación de la mezcla y que se formen vacíos, luego se retiró el material que sobresalió por la parte superior del molde.

Los ladrillos se secaron al aire por 48 horas en un secado natural tipo invernadero, y luego fueron secados en horno a 110°C por 24 horas, luego, se dejaron enfriar durante 4 horas a una temperatura de 23°C con una humedad relativa de 50%.

La etapa de cocción es quizás la más decisiva en el proceso de elaboración de los ladrillos, esto se debe a que durante dicha fase el ladrillo adquiere las propiedades deseadas, los ladrillos al ponerse en cocción deben pasar por diferentes estados, ocurriendo así distintas reacciones, que

Análisis y propuesta para el uso potencial de biosólidos de PTAR en la fabricación de ladrillos de arcilla

dependen principalmente de la granulometría, los minerales presentes en la mezcla y sus propiedades químicas

Para realizar este proceso se cuenta con 4 hornos tipo Colmena, son hornos elaborados en forma de cúpula, estos emiten los gases a través de chimeneas, los ladrillos ingresan por una abertura que se encuentra al costado, se carga el horno manualmente desde el piso hasta el techo. El carbón, es administrado de manera manual, el tiempo de cocción es de 4 días y 4 días de enfriamiento.

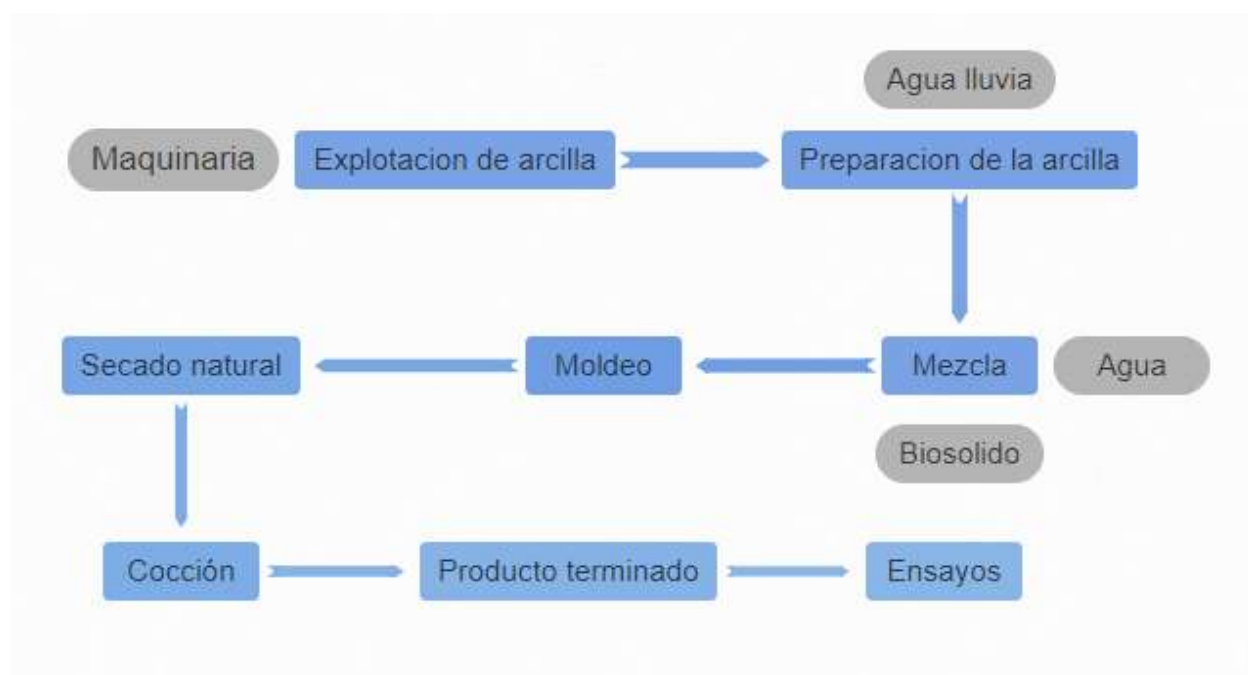


Ilustración 10 Elaboración de ladrillos; Fuente: Propia

6.3 Ensayos

Según la NTC 4205-2 (Instituto colombiano de normas técnicas, 2009) las unidades fabricadas corresponden a unidades macizas ya que no tienen perforaciones y son de tipo común, para estas unidades de mampostería no estructural, según la misma norma, debe cumplir con los límites mínimos en cuanto a resistencia a la compresión y absorción expuestos en la tabla 9 para la mampostería no estructural y la tabla 10 y 11 para la mampostería estructural (ICONTEC, 2000).

Análisis y propuesta para el uso potencial de biosólidos de PTAR en la fabricación de ladrillos de arcilla

Tabla 9 Propiedades físicas mampostería no estructural

Tipo de ladrillo	Resistencia mínima a la compresión		Absorción de agua máxima en %	
	MPa (Kgf/cm ²)		Interior	
	Promedio 5 unidades	Unidad	Promedio 5 unidades	Unidad
Perforado horizontal	3.0 (30)	2.0 (20)	17	20
Perforado vertical	14.0 (140)	10.0 (100)	17	20
Macizo	14.0 (140)	10.0 (100)	17	20
Unidades perforadas horizontalmente	2.0 (20)	1.5 (15)	17	20

Fuente: NTC 4205-2

Tabla 10 Resistencia mínima a la compresión mampostería estructural

Tipo de ladrillo	Resistencia mínima a la compresión	
	MPa (Kgf/cm ²)	
	Promedio 5 unidades	Unidad
Perforado horizontal	5 (50)	3.5 (35)
Perforado vertical	18.0 (180)	15.0 (150)
Macizo	20.0 (200)	15.0 (150)

Fuente: NTC 4205-1

Análisis y propuesta para el uso potencial de biosólidos de PTAR en la fabricación de ladrillos de arcilla

Tabla 11 Absorción máxima mampostería estructural

Tipo de ladrillo	Absorción de agua máxima en %	
	Interior	
	Promedio 5 unidades	Unidad
Perforado horizontal	13	16
Perforado vertical	13	16
Macizo	13	16

Fuente: NTC 4205-1

6.3.1 Absorción de agua

Para este ensayo se utilizó una balanza analítica que cumplía con las condiciones requeridas por la NTC 4017 (ICONTEC, 2005) y no fue necesaria la eliminación de la silicona del producto ya que no se le añadió. Para este ensayo se utilizaron 5 unidades de cada una de las dosificaciones.

La absorción es un parámetro clave en la calidad de un ladrillo, entre menos agua se infiltre el ladrillo será más resistente a los efectos del medio ambiente. Inicialmente, se define mediante la ecuación 1:

Ecuación 1

$$\% \text{ absorción} = \frac{100 \times (W_{SS} - W_S)}{W_S}$$

Fuente: NTC 4017

Donde:

W_S = peso seco del ladrillo

W_{SS} = peso saturado del ladrillo después de ser sumergido 24 horas en agua fría

Se secaron 5 unidades a 110°C durante 24 horas y se dejaron secar a 18°C con una humedad relativa de 61% durante 4h, luego se pesaron las 5 unidades de cada una de las mezclas realizadas,

Análisis y propuesta para el uso potencial de biosólidos de PTAR en la fabricación de ladrillos de arcilla

evidenciando una disminución en el peso seco promedio de las muestras conforme la cantidad de biosólido adicionado llegando a perder cerca de un 36% de su peso.

Tabla 12 Peso seco

Mezcla	Porcentaje de adición de biosólidos en la Mezcla	Unidades	Peso seco Promedio
#	%	U	Kg
1	0	5	3.3336
2	5	5	3.0680
3	10	5	2.7008
4	15	5	2.5408

Fuente: Propia

La reducción de peso seco muestra un comportamiento exponencial, con un R^2 de 0.9803.

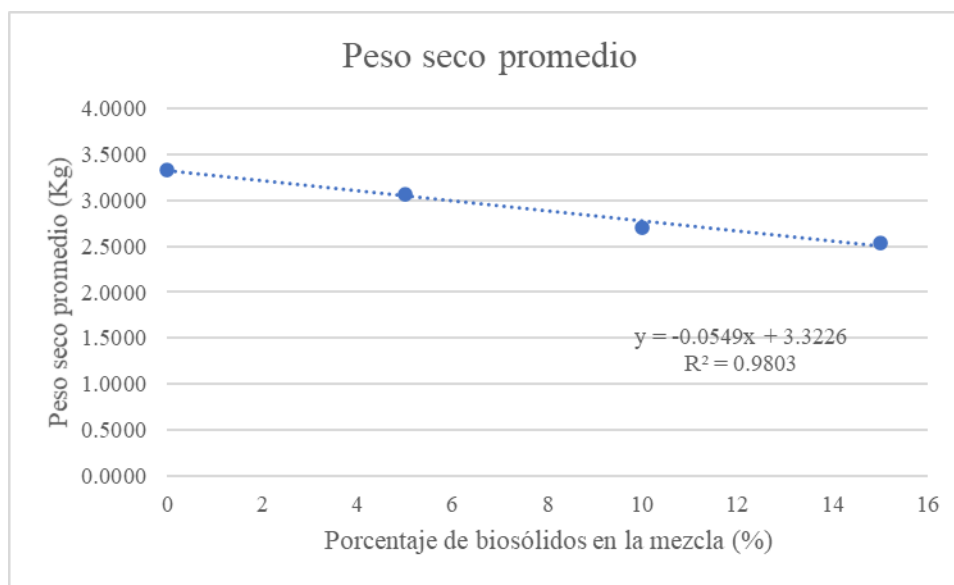


Ilustración 11 Grafico peso seco respecto a % de biosólidos; Fuente: Propia

Luego, se sumergieron los ladrillos en agua limpia, a temperatura ambiente durante 24h y se pesaron los ladrillos de manera inmediata, calculando los valores promedio para cada una de las distintas mezclas, obteniendo los resultados de la tabla 13.

Análisis y propuesta para el uso potencial de biosólidos de PTAR en la fabricación de ladrillos de arcilla

Tabla 13 Absorción

Mezcla	Porcentaje de adición de biosólidos en la Mezcla	unidades	Peso seco	Peso seco Promedio	Peso sumergido	Peso sumergido promedio	Absorción	Absorción promedio
#	%	U	Kg	Kg	Kg	Kg	%	%
1	0	1	3.2909	3.3336	3.5335	3.5623	7.37	6.86
		2	3.2754		3.5101		7.16	
		3	3.2876		3.5384		7.63	
		4	3.3204		3.5482		6.86	
		5	3.4937		3.6813		5.37	
2	5	1	3.0540	3.068	3.3393	3.3493	9.34	9.17
		2	3.0501		3.3073		8.43	
		3	3.0943		3.3864		9.44	
		4	3.0297		3.3701		11.24	
		5	3.1119		3.3433		7.44	
3	10	1	2.7231	2.7008	2.9400	2.9812	7.97	10.38
		2	2.7442		3.0060		9.54	
		3	2.6917		3.0334		12.70	
		4	2.6873		3.0095		11.99	
		5	2.6577		2.9171		9.76	
4	15	1	2.4927	2.5408	2.8895	2.8549	15.92	12.36
		2	2.5695		2.8509		10.95	
		3	2.4996		2.8258		13.05	
		4	2.5577		2.8332		10.77	
		5	2.5845		2.8751		11.24	

Fuente: Propia

Como se puede observar los valores de absorción tanto para elementos individuales como para el valor promedio, se encuentran dentro del rango de admisión definido en la NTC 4205-1 y 4205-2, siendo así, elementos que pueden ser utilizados tanto para uso estructural como no estructural, no obstante, se pudo evidenciar que los valores de la mezcla N° 4, se acercan a los

Análisis y propuesta para el uso potencial de biosólidos de PTAR en la fabricación de ladrillos de arcilla

valores límites admitidos según la 4205-1 por lo que probablemente un elemento con una adición mayor a la utilizada en este caso podría superar dichos límites.

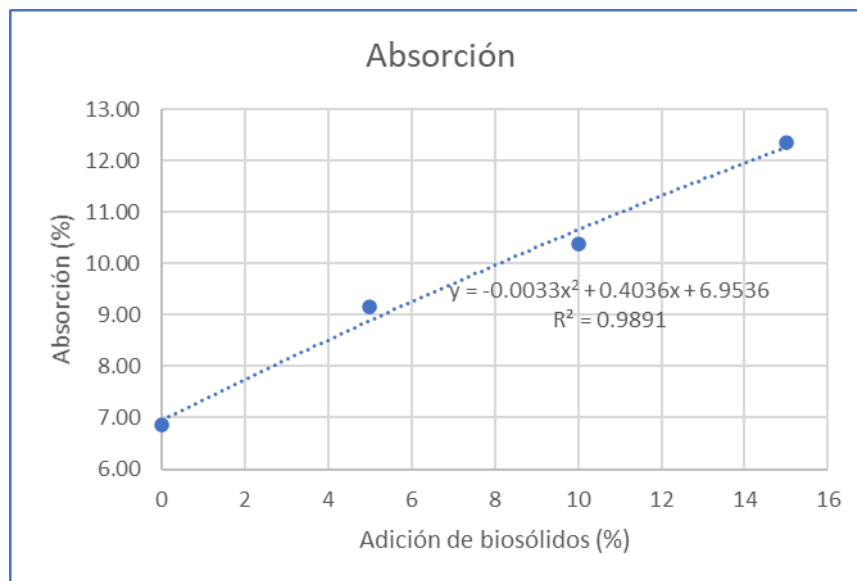


Ilustración 12 Gráfico % de absorción de agua respecto % de adición de biosólidos; Fuente: Propia

6.3.2 Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión es la propiedad más importante de los ladrillos, ya que esta mide su capacidad de soportar cargas, esta se define mediante la Ecuación 2.

Ecuación 2

$$\text{Resistencia a la compresión, } C = \frac{W}{A}$$

Fuente: NTC 4017

Donde:

C = Resistencia del ladrillo en Pa x 10⁴

W = Carga máxima soportada en N

A = Promedio de las áreas brutas del ladrillo en cm²

Análisis y propuesta para el uso potencial de biosólidos de PTAR en la fabricación de ladrillos de arcilla

la resistencia a la compresión promedio de las unidades se evidencia en la tabla 14, donde se evidencia que los ladrillos cumplen con la resistencia a la compresión, dada por la NTC 4205-1 y NTC 4205-2 por lo que pueden ser utilizados tanto para mampostería estructural como mampostería no estructural, sin embargo, los ladrillos sin adición de biosólido fueron en promedio 60% más resistentes que los de la mezcla 4 que es la que mayor cantidad de biosólidos incluyo, esto puede deberse al aumento de la porosidad del ladrillo.

Tabla 14 Resistencia a la compresión

Mezcla	Porcentaje de adición de biosólidos en la Mezcla	unidades	Área	Área promedio	P		C	
					P	P promedio	C	C Promedio
#	%	U	cm2	cm2	KN	KN	MPa	MPa
1	0	1	60	60	282	277.8	47.0	46.30
		2	61		281		46.1	
		3	59		274		46.4	
		4	61		273		44.9	
		5	59		278		47.2	
2	5	1	59	60	219	223.2	37.1	37.20
		2	59		221		37.3	
		3	59		222		37.5	
		4	60		225		37.2	
		5	62		229		36.9	
3	10	1	61	60	186	184.8	30.6	30.80
		2	59		186		31.7	
		3	60		185		30.6	
		4	60		185		31.1	
		5	60		181		30.1	
4	15	1	59	60	168	171	28.4	28.50
		2	59		171		28.7	
		3	61		169		27.7	
		4	59		171		28.7	
		5	61		176		29.0	

Análisis y propuesta para el uso potencial de biosólidos de PTAR en la fabricación de ladrillos de arcilla

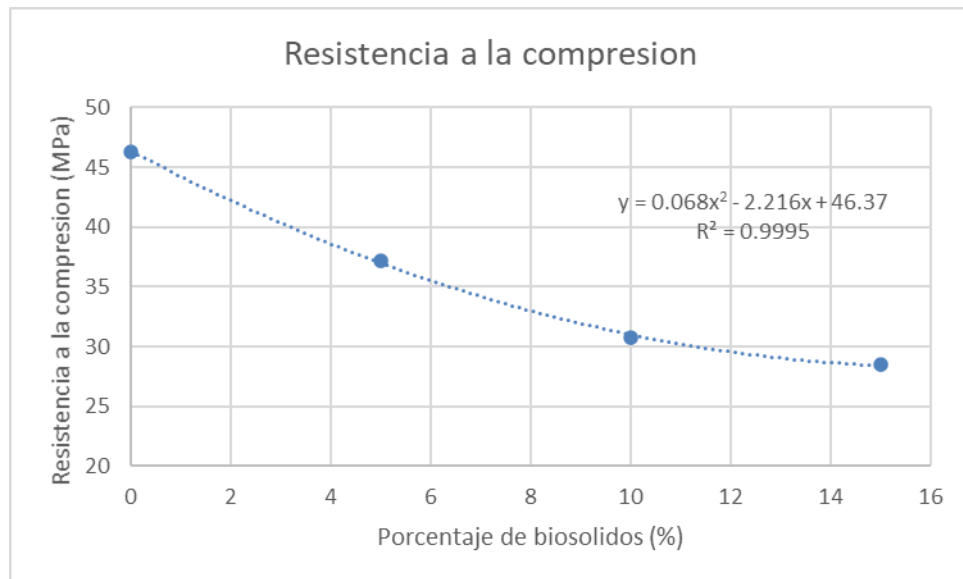


Ilustración 13 Grafico resistencia a la compresión (MPa) respecto al % de biosólidos; Fuente: Propia

7 Conclusiones y recomendaciones

En este trabajo se pretendía evaluar los posibles impactos ambientales de adicionar biosólidos generados en la PTAR de la UMNG – Cajicá, tanto positivos como negativos, dentro de los más relevantes se encuentra la incorporación de los biosólidos al ciclo productivo permitiendo el desarrollo de la economía circular y evitando su eliminación a través de incineración afectando el recurso aire, vertimiento al mar afectando el recurso agua o disposición en rellenos sanitarios afectando principalmente el recurso suelo, además dichos rellenos sanitarios consumen parte de su vida útil en la disposición de dicho material.

Del mismo modo, prevenir el su uso directo al suelo o mediante compostaje de los biosólidos, ya que por el contenido de microplásticos que se encuentran, se puede ver afectado el recurso suelo principalmente y la salud humana en caso de utilizarse como compost para las plantaciones de alimentos.

Igualmente, la extracción masiva de un recurso no renovable como la arcilla, que implica afectaciones a los recursos aire agua y suelo, nos motivan a buscar sustitutos para la fabricación de elementos cerámicos, en este caso particular ladrillos.

La principal desventaja en el uso de los biosólidos en la producción de ladrillos cerámicos es el transporte adicional que representa el llevar los biosólidos desde las PTAR en donde se generan hasta las plantas de producción de ladrillos, del mismo modo, la calidad de los ladrillos presenta una disminución al aumentar el porcentaje de los biosólidos

Existen otros parámetros, como el aislamiento térmico y acústico, que se ven mejorados con el aumento en la porosidad de los ladrillos, lo cual podría hacerlos ventajosos en escenarios como zonas de temperaturas extremas donde sea necesario utilizar calefacción o aire acondicionado, disminuyendo la cantidad de energía necesaria para mantener el lugar a la temperatura deseada.

En base a la bibliografía consultada se puede concluir que la adición de este material implicaría una reducción en la mayoría de los impactos medios con relación a la fabricación de ladrillos tradicionales, exceptuando el agotamiento de los recursos hídricos.

Los principales factores por los cuales se reducirían los impactos medios, en la fabricación de ladrillos con adición de biosólidos, es la prevención de la disposición temprana de los biosólidos, evitando lixiviados y emisiones, junto con la disminución de energía necesaria para la cocción de los ladrillos, debido a su contenido de materia orgánica.

Análisis y propuesta para el uso potencial de biosólidos de PTAR en la fabricación de ladrillos de arcilla

El principal factor que reduce los impactos medios al adicionar biosólidos en la mezcla de los ladrillos de arcilla, la prevención de la eliminación temprana de los biosólidos, ya que esta afecta el recurso aire cuando se opta por incineración, recurso agua al verterlo a los ríos y mares y principalmente el recurso suelo cuando se deposita en rellenos sanitarios, al igual que el hecho de que la disposición de los biosólidos en dichos rellenos disminuye su capacidad y por ende su vida útil. Es importante recalcar que las afectaciones anteriormente mencionadas también tienen impactos sobre la salud humana por lo que debe ser un tema tratado con urgencia.

Otro de los beneficios ambientales que trae consigo el uso de los biosólidos en la fabricación de ladrillos de arcilla, es el reemplazo de arcilla por biosólidos, de tal forma que si reemplazamos el 15% de la arcilla utilizada y teniendo en cuenta que para el año 2015 se produjeron 284.056 ton/mes de ladrillos en la región de Bogotá D.C. y Cundinamarca, eso implicaría una reducción en el uso de arcilla de más de 42.608 ton/mes de uso de arcilla en este sector, y así mismo, una disminución en la extracción de este recurso no renovable.

El consumo energético en la cocción de ladrillos se ve reducido hasta en un 25% debido a que la materia orgánica que contienen los biosólidos, se calienta más fácil y sirve como combustible en dicho proceso, reduciendo así el uso de carbón mineral, principal combustible utilizado por las ladrilleras de Bogotá D.C. y Cundinamarca

Aunque el análisis de ciclo de vida es una herramienta que estudia los impactos ambientales desde la cuna hasta la tumba, en la producción de los ladrillos de arcilla el escenario que muestra mayores impactos de manera sustancial es el de la producción en su proceso de secado y cocción, por lo que la alternativa del uso de biosólidos es atractiva al requerir menos energía en su proceso de cocción gracias a su alto contenido de materia orgánica.

La distancia que deban ser transportados los biosólidos hasta la planta de producción de ladrillos, es un factor influyente de forma negativa dentro de los impactos medios, debido principalmente al consumo de combustible.

En este trabajo se estudió la adición de diferentes porcentajes de biosólidos en la mezcla y fabricación de ladrillos de arcilla macizos, 0, 5, 10 y 15%, evaluando las propiedades físicas que establece la NTC 4205-2 para ladrillos de mampostería no estructural, donde se encontró que, los ladrillos disminuyen su calidad con la adición de los biosólidos.

Aunque los ladrillos estudiados en este trabajo disminuyeron su resistencia a la compresión en casi un 40%, al adicionarle un 15% de biosólidos, aun cumplen con lo estipulado para su uso en mampostería estructural y estructural según la normativa colombiana NTC 4205 para dicho parámetro.

Análisis y propuesta para el uso potencial de biosólidos de PTAR en la fabricación de ladrillos de arcilla

En cuanto a la absorción en la mezcla con adición del 15% se acerca bastante a los límites admisibles por la norma mencionada anteriormente, aun cumple con los parámetros definidos en ella, sin embargo, es necesario estudiar un porcentaje de adición mayor para conocer el comportamiento de la absorción más a fondo y poder establecer un límite en la adición de los biosólidos para su cumplimiento.

Se recomienda para futuros estudios, evaluar otros parámetros físicos y mecánicos, como la porosidad de los ladrillos con el fin de poder implementar su uso para viviendas sostenibles ya que en caso de aumentar la porosidad reduciría el consumo energético en calefacción o aire acondicionado, al igual que los demás beneficios medioambientales mencionados anteriormente.

Se recomienda evaluar la posibilidad del uso de estos ladrillos y sus bondades medioambientales y de confort no solo en vivienda, también en uso para tránsito peatonal y vehicular.

Para futuros estudios se recomienda analizar las emisiones generadas en la cocción de ladrillos de arcilla con adición de biosólidos, con el fin de conocer las posibles emisiones que pueden generarse durante dicho proceso y si varían en cuanto a las generados en la cocción de los ladrillos que no tienen adición de biosólidos

Bibliografía

- Alisawi, H. A. O. (2020). Performance of wastewater treatment during variable temperature. *Applied Water Science*, 10(4), 1–6. <https://doi.org/10.1007/s13201-020-1171-x>
- Balaguera, A., Carvajal, G. I., Albertí, J., & Fullana-i-Palmer, P. (2018). Life cycle assessment of road construction alternative materials: A literature review. *Resources, Conservation and Recycling*, 132(December 2017), 37–48. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.01.003>
- Balgaranova, J., Petkov, A., Pavlova, L., & Alexandrova, E. (2003). Utilization of wastes from the coke-chemical production and sewage sludge as additives in the brick-clay. *Water, Air, and Soil Pollution*, 150(1–4), 103–111. <https://doi.org/10.1023/A:1026190417523>
- Buyle, M., Braet, J., & Audenaert, A. (2012). *LCA in the construction industry : a review*. 6(4), 397–405.
- CAEM. (2015). Validate inventory of the brick sector in Colombia. *Climate & Clean Air Coalition*, 134. <https://www.ccacoalition.org/en/resources/inventory-and-assessment-tool-colombia-black-carbon-and-other-pollutant-emissions-brick>
- Case, S. D. C., Oelofse, M., Hou, Y., Oenema, O., & Jensen, L. S. (2017). Farmer perceptions and use of organic waste products as fertilisers – A survey study of potential benefits and barriers. *Agricultural Systems*, 151, 84–95. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.11.012>
- Castillo, D. M., Rojas, J. F., Puerto, C. F., Villalba, N. A., & Córdoba, D. C. (2019). Estudio sectorial de los servicios públicos domiciliarios de acueducto y alcantarillado 2018. In *Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios*. chrome-extension://oemmndcblldboiebfnladdacbfmadadm/<https://www.superservicios.gov.co/sites/>

Análisis y propuesta para el uso potencial de biosólidos de PTAR en la fabricación de ladrillos de arcilla

default/archivos/Publicaciones/Publicaciones/2020/Ene/informe_sectorial_aa_2018-20-12-2019.pdf

Charles Fitts. (2012). Physical Properties. In *Groundwater Science* (pp. 23–45).

<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384705-8.00002-9>

Chávez Porra, A., Rodríguez González, A., Rangel, A. A., & Pinzon, L. F. (2014). Análisis del Manejo de Biosólidos Provenientes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales -PTAR Tratados con Vermicompostaje para ser Usados en la Análisis del Manejo de Biosólidos Provenientes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales – PTAR Trata. *VII Simposio Internacional de Ingeniería Industrial: Actualidad y Nuevas Tendencias 2014*.

Chávez Porras, Á., Velásquez Castiblanco, Y. L., & Casallas Ortega, N. D. (2017).

Características físico-químicas de humus obtenido de biosólidos provenientes de procesos de tratamiento de aguas residuales. *Informador Técnico*, 81(2), 122.

<https://doi.org/10.23850/22565035.939>

Çimen, Ö., Gök, G., Çelebi, H., & Gök, O. (2014). The possible environmental impacts of the biosolids in the worldwide. *Journal of Selçuk University Natural and Applied Science*, 1, 1144–1154.

Clay - Rock types found in the British Isles - GCSE Geography Revision - BBC Bitesize. (n.d.).

Retrieved November 10, 2021, from

<https://www.bbc.co.uk/bitesize/guides/zs4y6fr/revision/4>

Coa, V. V., Lubes, V., Polster, J., Silva, M. M. de A., & Lubes, G. (2019). Relationship between Structure and Odor. *Food Aroma Evolution*, November, 679–694.

<https://doi.org/10.1201/9780429441837-31>

Collivignarelli, M. C., Abbà, A., Carnevale Miino, M., & Damiani, S. (2019). Treatments for

Análisis y propuesta para el uso potencial de biosólidos de PTAR en la fabricación de ladrillos de arcilla

color removal from wastewater: State of the art. *Journal of Environmental Management*, 236(September 2018), 727–745. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.094>

Collivignarelli, M. C., Canato, M., Abbà, A., & Carnevale Miino, M. (2019). Biosolids: What are the different types of reuse? *Journal of Cleaner Production*, 238. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117844>

Congreso de Colombia. (2001). LEY 685 DE 2001 (agosto 15) Por la cual se expide el Código de Minas y se dictan otras disposiciones. El Congreso de Colombia. *Código de Minas Comentado 3 Edición, agosto 15*, 17–456. <https://doi.org/10.2307/j.ctv13vdh37.4>

Crini, G., & Lichtfouse, E. (2019). Advantages and disadvantages of techniques used for wastewater treatment. *Environmental Chemistry Letters*, 17(1), 145–155. <https://doi.org/10.1007/s10311-018-0785-9>

Dabaieh, M., Heinonen, J., El-Mahdy, D., & Hassan, D. M. (2020). A comparative study of life cycle carbon emissions and embodied energy between sun-dried bricks and fired clay bricks. *Journal of Cleaner Production*, 275, 122998. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122998>

De Silva, G. H. M. J. S., & Perera, B. V. A. (2018). Effect of waste rice husk ash (RHA) on structural, thermal and acoustic properties of fired clay bricks. *Journal of Building Engineering*, 18(March), 252–259. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2018.03.019>

Faleschini, F., Zanini, M. A., Pellegrino, C., & Pasinato, S. (2016). Sustainable management and supply of natural and recycled aggregates in a medium-size integrated plant. *Waste Management*, 49(2016), 146–155. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.01.013>

Fiala, J., Mikolas, M., & Krejsova, K. (2019). Full Brick, History and Future. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 221(1). <https://doi.org/10.1088/1755->

Análisis y propuesta para el uso potencial de biosólidos de PTAR en la fabricación de ladrillos de arcilla

1315/221/1/012139

- Fořt, J., & Černý, R. (2020). Transition to circular economy in the construction industry: Environmental aspects of waste brick recycling scenarios. *Waste Management*, *118*, 510–520. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.09.004>
- Ghisellini, P., Cialani, C., & Ulgiati, S. (2016). A review on circular economy: The expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *Journal of Cleaner Production*, *114*(February), 11–32. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007>
- Giraldo Gómez, E. (2000). ¿Combinar o separar? Una discusión con un siglo de antigüedad y de gran actualidad para los bogotanos. *Revista de Ingeniería*, *11*, 21–30. <https://doi.org/10.16924/revinge.11.5>
- Hasatani, M., Itaya, Y., Muroie, K., & Taniguchi, S. (1993). Contraction characteristics of molded ceramics during drying. *Drying Technology*, *11*(4), 815–830. <https://doi.org/10.1080/07373939308916865>
- ICONTEC. (2000). NTC 4205. Ingeniería civil y arquitectura. Unidades de mampostería de arcilla cocida. Ladrillos y bloques cerámicos. *Norma Técnica Colombiana-4205*, 14.
- ICONTEC. (2005). NTC 4017. Métodos para muestreo y ensayos de unidades de mampostería y otros productos de arcilla. *Norma Técnica Colombiana-4017*, 1–30.
- Instituto colombiano de normas técnicas. (2009). *Unidades de mampostería de arcilla cocida. ladrillos y bloques cerámicos. parte 3: mampostería de fachada*. 571.
- Instituto Nacional De Vías. (2014). Norma INV E 124-14. *Análisis Granulométrico Por Medio Del Hidrómetro*, 1–9.
- J.A.Cusidó, M.Devant, M.Celebrovsky, J.Riba, & F.Arteaga. (1996). ECOBRICK A NEW

Análisis y propuesta para el uso potencial de biosólidos de PTAR en la fabricación de ladrillos de arcilla

CERAMIC MATERIAL FOR SOLAR BUILDINGS. *Universitat Politecnica de Catalunya*, 327–330. [https://doi.org/10.1016/0960-1481\(96\)88871-9](https://doi.org/10.1016/0960-1481(96)88871-9)

Kansaon, M., & De, S. G. (2019). *USE OF SLUDGE FROM SANITARY SEWAGE TREATMENT PLANTS (S . T . P) AND THEIR USE AS RAW MATERIAL IN THE MANUFACTURE OF BRICKS*. 16(November 1992), 823–840.

Khan, M. W., Ali, Y., De Felice, F., Salman, A., & Petrillo, A. (2019). Impact of brick kilns industry on environment and human health in Pakistan. *Science of the Total Environment*, 678, 383–389. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.369>

Kizinievič, O., Kizinievič, V., Pundiene, I., & Molotokas, D. (2018). Eco-friendly fired clay brick manufactured with agricultural solid waste. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 18(4), 1156–1165. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2018.03.003>

Krogmann, U., Boyles, L. S., Bamka, W. J., Chaiprapat, S., James, C., Martel, J., Krogmann, U., Boy, L. S., Bamka, W. J., & Chaiprapat, S. (1999). *Biosolids Management*. 71(5).

Limón, J. G. (2013). Los lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales, ¿problema o recurso? *Academia de Ingeniería México*, 45. <http://www.ai.org.mx/presentacion/los-lodos-de-las-plantas-de-tratamiento-de-aguas-residuales-¿problema-o-recurso>

Lingl, H. (1975). Removal of sewage sludge. *DE 2336267*.

Lingl, H. (1978). Method of using sludge for making ceramic articles. *US 4112033*.

Lofrano, G., & Brown, J. (2010). Wastewater management through the ages: A history of mankind. *Science of the Total Environment*, 408(22), 5254–5264. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.07.062>

Loryuenyong, V., Panyachai, T., Kaewsimork, K., & Siritai, C. (2009). Effects of recycled glass

Análisis y propuesta para el uso potencial de biosólidos de PTAR en la fabricación de ladrillos de arcilla

substitution on the physical and mechanical properties of clay bricks. *Waste Management*, 29(10), 2717–2721. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.05.015>

Milošević, M., & Logar, M. (2017). Properties and characterization of a clay raw material from Miličinica (Serbia) for use in the ceramic industry. *Clay Minerals*, 52(3), 329–340. <https://doi.org/10.1180/claymin.2017.052.3.04>

Ministerio de ambiente vivienda y desarrollo territorial. (2010). Decreto 3930 del 2010. *Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial*, 29. <http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/bf-Resolución 610 de 2010 - Calidad del Aire.pdf>

Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio. (2014). *Decreto 1287 “Por el cual se establecen criterios para el uso de los biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales.”*

Mohajerani, A., Kadir, A. A., & Larobina, L. (2016). A practical proposal for solving the world’s cigarette butt problem: Recycling in fired clay bricks. *Waste Management*, 52, 228–244. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.03.012>

Mohajerani, A., & Karabatak, B. (2020). Microplastics and pollutants in biosolids have contaminated agricultural soils: An analytical study and a proposal to cease the use of biosolids in farmlands and utilise them in sustainable bricks. *Waste Management*, 107, 252–265. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.04.021>

Mohajerani, A., Ukwatta, A., Jeffrey-Bailey, T., Swaney, M., Ahmed, M., Rodwell, G., Bartolo, S., Eshtiaghi, N., & Setunge, S. (2019). A proposal for recycling the world’s unused stockpiles of treated wastewater sludge (biosolids) in fired-clay bricks. *Buildings*, 9(1). <https://doi.org/10.3390/buildings9010014>

Análisis y propuesta para el uso potencial de biosólidos de PTAR en la fabricación de ladrillos de arcilla

- Molina, F., Sierra, J., Acevedo, S., Maya, G., Toro, M., Alvarez, C., & Uribe, J. (1999). *Manual de caracterización de aguas residuales industriales*. (pp. 1–54).
- Mousharraf, A., Hossain, M. S., & Islam, M. F. (2012). Potential of Locally Available Clay as Raw Material for Traditional-Ceramic Manufacturing Industries. *Journal of Chemical Engineering*, 26(October 2016), 34–37. <https://doi.org/10.3329/jce.v26i1.10179>
- Mozo, W., & Gomez, A. (2016). Biosolids and biosolid ashes as inputs for producing construction materials such as bricks-like Construction Materials. *Tecciencia*, 11(21), 45–51. <https://doi.org/10.18180/tecciencia.2016.21.8>
- Muñoz Velasco, P., Morales Ortíz, M. P., Mendivil Giró, M. A., & Muñoz Velasco, L. (2014). Fired clay bricks manufactured by adding wastes as sustainable construction material - A review. *Construction and Building Materials*, 63, 97–107. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.03.045>
- Neczaj, E., & Grosser, A. (2018). Circular Economy in Wastewater Treatment Plant—Challenges and Barriers. *Proceedings*, 2(11), 614. <https://doi.org/10.3390/proceedings2110614>
- Norma Técnica Colombiana. (2005). *NTC 4051*.
- Norma Técnica Colombiana. (2004). *NTC 5167 PRODUCTOS ORGÁNICOS USADOS COMO ABONOS O FERTILIZANTES Y ENMIENDAS DE SUELO*. 1–32.
- Nysdec. (n.d.). *Soil Studies: Soil Particle Sizes- NYSDEC Environmental Education Lesson Plan*.
- Okuno, N., Ishikawa, Y., Shimizu, A., & Yoshida, M. (2004). Utilization of sludge in building material. *Water Science and Technology*, 49(10), 225–232. <https://doi.org/10.2166/wst.2004.0650>
- Okuno, N., & Yamada, A. (2000). Evaluation of full scale thermal solidification processes

Análisis y propuesta para el uso potencial de biosólidos de PTAR en la fabricación de ladrillos de arcilla

implemented in Tokyo lightweight aggregate, slag and brick. *Water Science and Technology*, 41(8), 69–76. <https://doi.org/10.2166/wst.2000.0144>

Okuno, Nagaharu, & Takahashi, S. (1997). Full scale application of manufacturing bricks from sewage. *Water Science and Technology*, 36(11), 243–250. [https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(97\)00686-0](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(97)00686-0)

Ornam, K., Kimsan, M., Ngkoimani, L. O., & Santi. (2017). Study on Physical and Mechanical Properties with Its Environmental Impact in Konawe - Indonesia upon Utilization of Sago Husk as Filler in Modified Structural Fly Ash - Bricks. *Procedia Computer Science*, 111(2015), 420–426. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.06.043>

Sammut-Bonnici, T., & Galea, D. (2017). *SWOT Analysis*. i(October), 5–9. <https://doi.org/10.1002/9781118785317.weom120103>

Santacoloma-Londoño, S. P., Buitrago-González, M. E., Colorado-Molina, K., Suárez-Pineda, I., Martínez-Martina, M. A., & Villegas-Méndez, L. C. (2020). Agricultural Use of Biosolids Generated in Wastewater Treatment of a Food Industry. *Revista Facultad de Ingeniería*, 29(54), e10666. <https://doi.org/10.19053/01211129.v29.n54.2020.10666>

Separate Sewers / SSWM - Find tools for sustainable sanitation and water management! (n.d.). Retrieved July 24, 2021, from <https://sswm.info/sswm-university-course/module-2-centralised-and-decentralised-systems-water-and-sanitation/further/separate-sewers>

Shaw, T. (1889). Improvements in utilizing the waste product from swage works for the manufacture of bricks, tiles, quarries, building blocks, and the like. *UK 12623*.

Silvana Torri, M. C. (2017). ENVIRONMENTAL I MPACT A SSESSMENT Prepared by. *Environment*, 27(November), 275–302.

Slim, J. A., & Wakefield, R. W. (1991). Utilisation of sewage sludge in the manufacture of clay

Análisis y propuesta para el uso potencial de biosólidos de PTAR en la fabricación de ladrillos de arcilla

bricks. *Water SA*, 17(3), 197–202.

Teh, S. H., Wiedmann, T., & Moore, S. (2018). Mixed-unit hybrid life cycle assessment applied to the recycling of construction materials. *Journal of Economic Structures*, 7(1).
<https://doi.org/10.1186/s40008-018-0112-4>

Tiab, D., & Donaldson, E. C. (2016). Porosity and Permeability. *Petrophysics*, 67–186.
<https://doi.org/10.1016/b978-0-12-803188-9.00003-6>

Ukwatta, A., & Mohajerani, A. (2017a). Characterisation of fired-clay bricks incorporating biosolids and the effect of heating rate on properties of bricks. *Construction and Building Materials*, 142, 11–22. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.047>

Ukwatta, A., & Mohajerani, A. (2017b). Effect of Organic Content in Biosolids on the Properties of Fired-Clay Bricks Incorporated with Biosolids. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(7), 04017047. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0001865](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001865)

Ukwatta, A., Mohajerani, A., Eshtiaghi, N., & Setunge, S. (2015). Variation in physical and mechanical properties of fired-clay bricks incorporating ETP biosolids. *Journal of Cleaner Production*, 119, 76–85. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.01.094>

Ukwatta, A., Mohajerani, A., Setunge, S., & Eshtiaghi, N. (2018). A study of gas emissions during the firing process from bricks incorporating biosolids. *Waste Management*, 74, 413–426. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.01.006>

United Nations. (2015). *World Population Prospects*. 6.

US EPA, R. 01. (n.d.). *What are Combined Sewer Overflows (CSOs)? | Urban Environmental Program in New England*.

USEPA. (1994). A plain English guide to the EPA Part 503 Biosolids Rule. *Epa-832/R-93/003*,

Análisis y propuesta para el uso potencial de biosólidos de PTAR en la fabricación de ladrillos de arcilla

September. <https://www.epa.gov/biosolids/plain-english-guide-epa-part-503-biosolids-rule>

Valdecantos, A., & Fuentes, D. (2018). Carbon balance as affected by biosolid application in reforestations. *Land Degradation and Development*, 29(5), 1442–1452.

<https://doi.org/10.1002/ldr.2897>

VALLEJO SANTACRUZ, A. M., & CASAS GARCÍA, E. M. (2018). ANÁLISIS OPERATIVO DEL PROCESO DE REMOCIÓN DE MATERIA ORGANICA POR LODOS ACTIVADOS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA - CAMPUS CAJICÁ, UTILIZANDO EL SOFTWARE LIBRE ASM1. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699.

Vieira, C. M. F., Pinheiro, R. M., Rodriguez, R. J. S., Candido, V. S., & Monteiro, S. N. (2016). Clay bricks added with effluent sludge from paper industry: Technical, economical and environmental benefits. *Applied Clay Science*, 132–133, 753–759.

<https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.07.001>

Vuorinen, H. S., Juuti, P. S., & Katko, T. S. (2007). History of water and health from ancient civilizations to modern times. *Water Science and Technology: Water Supply*, 7(1), 49–57.

<https://doi.org/10.2166/ws.2007.006>

Wastewater treatment - Sewerage systems | *Britannica*. (n.d.). Retrieved July 24, 2021, from <https://www.britannica.com/technology/wastewater-treatment/Sewerage-systems>

Wiebusch, B., & Seyfried, C. F. (1997). Utilization of sewage sludge ashes in the brick and tile industry. *Water Science and Technology*, 36(11), 251–258. [https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(97\)00688-4](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(97)00688-4)

Xiao, Y., & Watson, M. (2019). Guidance on Conducting a Systematic Literature Review.

Análisis y propuesta para el uso potencial de biosólidos de PTAR en la fabricación de ladrillos de arcilla

Journal of Planning Education and Research, 39(1), 93–112.

<https://doi.org/10.1177/0739456X17723971>

Zaragoza. (2010). *Características de las aguas residuales*. 62.

<http://cidta.usal.es/cursos/ETAP/modulos/libros/Caracteristicas.PDF>

Zhang, L. (2013). Production of bricks from waste materials - A review. *Construction and Building Materials*, 47, 643–655. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.043>

Zhang, Z., Wong, Y. C., Arulrajah, A., & Horpibulsuk, S. (2018). A review of studies on bricks using alternative materials and approaches. *Construction and Building Materials*, 188, 1101–1118. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.152>