



**REVISIÓN DE ESTADO DEL ARTE: “LA INDUSTRIA DE LA FABRICACIÓN DE
LADRILLOS COMO COMPLEMENTO PARA LA GESTIÓN DEL TRATAMIENTO
A LAS AGUAS RESIDUALES”**

LUISA FERNANDA MUÑOZ UMAÑA

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS SECCIONAL TUNJA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
DÉCIMO SEMESTRE
TUNJA, BOYACÁ
2021**





**REVISIÓN DE ESTADO DEL ARTE: “LA INDUSTRIA DE LA FABRICACIÓN DE
LADRILLOS COMO COMPLEMENTO PARA LA GESTIÓN DEL TRATAMIENTO
A LAS AGUAS RESIDUALES”**

**UNA MONOGRAFÍA PRESENTADA PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO (A) DE CIVIL**

**DIRECTOR
WILLIAM RICARDO MOZO MORENO MSC.**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS SECCIONAL TUNJA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
DÉCIMO SEMESTRE
TUNJA, BOYACÁ
2021**





Nota de Aceptación

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Tunja 01 de noviembre de 2020 (18 mayo de 2021)





Dedicó este trabajo a Dios por sus bendiciones derramadas sobre mí para cumplir este sueño tan anhelado y a mi familia por su voz de aliento a lo largo de mi carrera profesional.





AGRADECIMIENTOS

Este trabajo va dedicado a Dios por sus bendiciones sobre mí, por permitirme culminar mi carrera profesional y cumplir uno de mis grandes sueños, a mis hermanas y mis padres por ser mi motor, gracias por su amor y apoyo incondicional, espero que el conocimiento que aporte a la comunidad sea una bendición para nosotros.

Agradezco la colaboración de mi tutor William Ricardo Mozo Msc por haber puesto su confianza en mí y quien por medio de su apoyo profesional ha sido un guía durante el proceso de desarrollo de la presente monografía, a la Universidad Santo Tomás que con la ayuda de sus profesionales me brindaron las herramientas necesarias en mi proceso de formación como ingeniera civil y a la planta de docentes de la facultad de ingeniería civil por inducir en mí una visión crítica y analítica, para llegar a ejercer con ética y profesionalismo.

“Cada ser es un universo intermitente y lleno de conocimiento, en donde la vida es ese constante cambio y equilibrio basado en Dios y en el tiempo para estar privilegiados de lo que conocemos como existencia”.





CONTENIDO

	Pág.
1. INTRODUCCIÓN.....	15
2. OBJETIVOS	17
2.1 OBJETIVO GENERAL	17
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
3. CAPITULO 1: LODOS O BIOSÓLIDOS COMO MATERIA PRIMA PARA LA FABRICACIÓN DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN (LADRILLOS).....	18
4. CAPITULO 2: METODOLOGÍAS DENTRO DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DE LADRILLOS.....	22
4.1 MATERIALES	22
4.2 MÉTODOS.....	26
5. CAPITULO 3: MÉTODOS, NORMAS Y ENSAYOS PARA EVALUAR LA CALIDAD DE LOS LADRILLOS.....	37
5.1 ANÁLISIS MECÁNICO.....	37
5.2 ANÁLISIS FÍSICO.....	40
5.3 ANÁLISIS QUÍMICO	53
5.4 ANÁLISIS MINERALÓGICO (DRX).....	55
5.5 ANÁLISIS TÉRMICO.....	56
5.6 ANÁLISIS DE SUSTANCIAS PELIGROSAS.....	58
5.6 ANÁLISIS DE VIABILIDAD AMBIENTAL.....	59
5.7 MARCO NORMATIVO	59
6 CAPITULO 4: RESULTADOS DE INCORPORAR EL LODO O BIOSÓLIDO COMO MATERIA PRIMA PARA LA FABRICACIÓN DE LADRILLOS	65
7. CONCLUSIONES.....	79
BIBLIOGRAFÍA.....	83
ANEXOS	88





LISTA DE TABLAS

Pág

Tabla 1. Biosólido producido en Colombia al día	18
Tabla 2. Porcentajes Optimos para la mezcla.	27
Tabla 3. Tipo de Conformado Utilizados en la Revisión Bibiográfica.....	31
Tabla 4. Ciclo de Secado.....	32
Tabla 5. Temperatura óptima de Cocción	35
Tabla 6. Contenidos de Humedad Residual.....	36
Tabla 7. Ensayo de Resistencia a la Compresión.	37
Tabla 8. Ensayo Resistencia a la Flexión.	39
Tabla 9. Ensayo de Granulometría.	41
Tabla 10. Ensayo Limites de Atterberg.	43
Tabla 11. Ensayo de SSA.....	45
Tabla 12. Ensayo Densidad Aparente.....	46
Tabla 13. Ensayo Gravedad Específica.	46
Tabla 14. Contracción del anillo de Fuego.	47
Tabla 15. Ensayo de Humedad Optima (OMC).....	48
Tabla 16. pH.....	49
Tabla 17. Ensayo Porsidad Aparente.....	50
Tabla 18. Ensayo de Absorción de agua.	51
Tabla 19. Pérdida de Peso por Ignición.	52
Tabla 20. Ensayo de Fluorecencia de Rayos X.	53
Tabla 21. Microscopía Electrónica.	54
Tabla 22. Ensayo de Difracción de rayos X.	55
Tabla 23. Análisis Térmico (TGA).	56
Tabla 24. Ensayo de TCLP.....	58
Tabla 25. Ensayo de Lixiviación en Botella.	58
Tabla 26. Dimensiones Modulares.....	60
Tabla 27. Absorción Máxima de Agua.	61
Tabla 28. Resistencia exigida por la NTC	61
Tabla 29. Tasa inicial de absorción de agua en los mampuestos.	62
Tabla 30. Normativa encontrada en las 26 revisiones bibliográficas.	62
Tabla 31. Norma en la investigación de cada autor.	64
Tabla 32. Resultados Físico - Mecánicos del Biosólido.....	65
Tabla 33. Resultados de la composición mineralógica del Biosólido.....	66
Tabla 34. Propiedades Físicas del Biosólido.....	66
Tabla 35. Composición química del Biosólido.	67
Tabla 36. Propiedades Físico - Mecániza del Biosólido Seco.	68
Tabla 37. Composición Minerológica del Biosólido Seco.	68
Tabla 38. Propiedades Físicas del Biosólido Seco.....	69





Tabla 39. Composición Química del Lodo Seco.....	70
Tabla 40. Resultados de Implementar Ceniza de Biosólido.	70
Tabla 41. Propiedades Físicas de la Ceniza de Biosólido.	71
Tabla 42. Composición Mineral de la Ceniza de Biosólido.	72
Tabla 43. Composición Química de la Ceniza de Biosólido.	72
Tabla 44. Resultados de Implementar Lodo Seco.....	74
Tabla 45. Composición minel del Lodo Seco.	74
Tabla 46. Propiedades Físicas de la Ceniza de Lodo.	75
Tabla 47. Composición Quiímica del Lodo Seco.....	76
Tabla 48. Resultados de Implementar Ceniza de Lodo.....	77
Tabla 49. Propiedades Físicas de la Ceniza de Lodo.	77
Tabla 50. Elementos Químicos Presentes en la Ceniza de Lodo.....	78





LISTA DE GRÁFICAS

Pág

Figura 1. Ficha técnica broquetas con 50% biosólido.	19
Figura 2. Resultados Resistencia a la compresión Fase I y Fase II.	20
Figura 3. Proceso de Aireación de la Planta de Tratamiento de Agua Residual, Paipa.	22
Figura 4. Sistemas de Tratamiento de Agua Residual por Región 2014-2017.	23
Figura 5. Porcentaje de Cobertura del Servicio de Alcantarillado en la Región Andina para el año 2018.	24
Figura 6. Lodo del lecho de secado del reactor UASB, tanque Imhoff y del digestor de lodos, Ptar Municipio de Sotaquirá	25
Figura 7. Porcentaje de uso de lodo y biosólido.	28
Figura 8. Ciclo de Cocción de un producto de arcilla.	34
Figura 9. Granulometría por Hidrómetro según norma colombiana (INV E 124 -07).	41
Figura 10. Granulometría por Hidrómetro según norma ASTM D6913-04 (2009), ASTM D7928-16 y ASTM D854-14, Ambato Perú	42
Figura 11. Límite Líquido.	43
Figura 12. Límite Plástico.	44
Figura 13. Medidor de de acidez, neutralidad o alcalinidad.	49
Figura 14. Unidades de Mampostería	60
Figura 15. Resultados de variables dependientes a 950°C	73





LISTA DE ANEXOS

	Pág
Anexo 1. Valores máximos permisibles de categorización de biosólidos para su uso.....	88
Anexo 2. Clase de biosólido según el límite de patógenos.	88
Anexo 3. Límite de Contaminantes.	89





GLOSARIO

ABSORCIÓN DE AGUA. La absorción es la propiedad de la unidad de concreto de absorber agua hasta llegar al punto de saturación durante un periodo de 24 horas, y está directamente relacionado con el paso de agua a través de las paredes de la unidad (Manuel & Lozano, 2016)

ARCILLA. Suelo de grano fino o la porción de grano fino de un suelo que es plástico dentro de una gama de proporciones de agua, y que presenta gran resistencia cuando se seca al aire (Manuel & Lozano, 2016).

BIOSÓLIDO. Es el aquello que resulta de un proceso de estabilización entre una relación de materia orgánica que se evidencia en los lodos y que principalmente se observa en el tratamiento de aguas residuales, estos poseen diferentes características como físicas, químicas y microbiológicas, así mismo no se tiene como Biosólidos los residuos que son retirados de ciertos equipos en fases iniciales o preliminares del tratamiento (Benito Ávila, 2020).

CENIZAS DE BIOSÓLIDO. Los lodos se incineran básicamente por razones de rentabilidad. Con altos costos de transporte asociados a la aplicación en tierra, la incineración resulta económica. Algunos argumentan que este método es seguro y que no afecta el medio ambiente. El producto final de la incineración lo constituye una ceniza estéril, exenta de patógenos (Benito Ávila, 2020).

COCCIÓN. La cocción de los productos cerámicos constituye la etapa más importante del proceso de fabricación. En esta fase se pone de manifiesto si las operaciones o etapas de fabricación anteriores se han desarrollado convenientemente y si el producto cocido ha adquirido las propiedades y características deseadas fijadas por las normas.

COLOR. La coloración es las arcillas se debe a la presencia de óxido de hierro, carbonato cálcico y otros componentes, (Velilla Diaz, 2008).

LADRILLO. Son piezas generalmente ortoédricas, obtenida por moldeo, secado y cocción a altas temperaturas de una pasta arcillosa, Se emplea en albañilería para la ejecución de fábricas de ladrillo, ya sean muros, tabiques, tabicones, etcétera. Se





distinguen tres tipos de unidades: perforación vertical, perforación horizontal y macizos (Manuel & Lozano, 2016).

MATERIA ORGÁNICA. Es la combinación de carbono, hidrogeno, y nitrógeno (Manuel & Lozano, 2016).

PLASTICIDAD. Se debe a la atracción química entre las partículas permitiendo adquirir diversas formas al agregar agua por la finura del grano, (Velilla Diaz, 2008).

POROSIDAD. El grado de porosidad varía cuando someten la arcilla al proceso de cocción, en donde, a menor temperatura, menor es esta propiedad extensiva, a causa de que los minerales no alcanzan el grado de vitrificación.

REFRACTARIEDAD. Todas las arcillas son refractarias, es decir resisten los aumentos de temperatura sin sufrir variaciones, (Velilla Diaz, 2008).

SECADO. El secado de un cuerpo arcilloso crudo es el mecanismo por el cual se elimina el agua que lo humedece. Este proceso es muy similar para los distintos cuerpos arcillosos. Sin embargo, a una determinada velocidad de secado, los efectos que se generan sobre cada cuerpo pueden ser muy diferentes entre cada uno de ellos, dependiendo de su naturaleza química y cristalográfica, de su granulometría y de su historia previa antes de llegar a la etapa de secado. El secado tendrá influencia sobre los siguientes parámetros: cantidad de agua residual, dimensiones longitudinales, superficiales (Mozo Moreno, 2021).





RESUMEN

En diferentes partes del mundo el manejo y disposición final de los lodos y/o biosólidos se ha convertido en un proceso complejo debido a las implicaciones ambientales que se derivan de su composición química y microbiológica por la cantidad de metales pesados que contienen, su origen se acredita al tratamiento de las aguas residuales de los diferentes procesos domésticos e industriales.

Por lo tanto, la necesidad de depurar el agua residual aumenta con el fin de contribuir a la recuperación de los cuerpos de agua según las políticas de manejo de aguas residuales y descontaminación de cuerpos de agua, sin embargo, al generarse el incremento en la construcción y funcionamiento de la planta de tratamiento de agua residual (PTAR), se produce gran cantidad de residuos conocidos como lodos, que al ser sometidos a un tratamiento secundario se convierte en biosólido y su disposición está dada por la el Decreto 1287 del Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio de Colombia para poder la clasificarlo (Tipo A o Tipo B).

En esta investigación se evalúa el aprovechamiento del lodo y/o biosólido que se genera a escala mundial y que afecta los ecosistemas, el suelo y los cuerpos de agua, en el reemplazo de manera parcial de la arcilla utilizada en la elaboración de ladrillos cerámicos en diferentes porcentajes como aditivo a la mezcla. Los porcentajes más óptimos varían entre un 5 a un 25% a una temperatura entre los 950 °C hasta los 1050 °C, aportando resistencias al ladrillo entre 8.6 Mpa hasta los 40.66 Mpa, según las características que presente el lodo y/o biosólido luego de ser depurado en la planta de tratamiento de agua residual (PTAR).

En base a las investigaciones es importante concluir que el lodo y/o biosólido al ser aprovechado en la mezcla de fabricación del ladrillo adquiere resistencias superiores a las estipuladas en la NTC 4205 debido a la retención de metales en su estructura, lo que se traduce en un mejor comportamiento ante las propiedades mecánicas del mismo.

PALABRAS CLAVE: Biosólido, Material de Construcción, Ladrillos, Planta de Tratamiento de Agua Residual, Composición Química, Alternativa, Resistencia.





ABSTRACT

The management and final disposal of sludge or biosolids has become a complex process in different parts of the world because of the environmental implications derived from its chemical and microbiological composition due to the number of heavy metals it contains, its origin is attributed to the treatment of wastewater from different domestic and industrial processes. Therefore, the need to treat wastewater increases to contribute to the recovery of water bodies according to the policies of wastewater management and decontamination of these bodies, however, when generating the increase in the construction and operation of the wastewater treatment plant (WWTP), a large amount of waste known as sludge is produced, and when subjected to secondary treatment it is converted into biosolids and its disposal is given by Decree 1287 of the Ministry of Housing, City and Territory of Colombia to classify it (Type A or Type B). This research aims to evaluate the utilization of the sludge or biosolid generated worldwide, which affects ecosystems, soil and water bodies, to partially replace the clay used in the production of ceramic bricks in different percentages as an additive to the mixture. The most optimal percentages vary between 5 to 25% at a temperature between 950 °C and 1050 °C, providing brick resistance between 8.6 Mpa and 40.66 Mpa, depending on the characteristics of the sludge or biosolid after being treated in the wastewater treatment plant (WWTP). Based on the research, it is important to conclude that the sludge or biosolids, when used in the brick manufacturing mixture, acquires higher resistance than those stipulated in Colombian technical standard NTC 4205 due to the retention of metals in its structure, which means a better behavior in terms of its mechanical properties.

Keywords: Biosolid, Construction Material, Bricks, Wastewater Treatment Plant, Chemical Composition, Alternative, Resistance.





1. INTRODUCCIÓN

Los lodos son residuos orgánicos con presencia de metales y microorganismos patógenos en su composición producidos a partir del tratamiento de las aguas residuales del sistema de alcantarillado y transformados bajo un tratamiento secundario conocido como estabilización por degradación biológica de carácter anaerobio para modificar sus propiedades y convertirlo en biosólido.

Según la superintendencia de servicios públicos domiciliarios (SSPD) (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2020) para el 2019 se registra un total de 712 plantas de tratamiento incrementando en un 1.82% respecto al 2018, lo que conlleva a un aumento considerable en la producción de este material residual conocido como lodo o biosólido como en la planta de tratamiento de agua residual (PTAR) el Salitre ubicada en Bogotá D.C. que produce alrededor de 165 Toneladas al día de lodos y/o biosólidos.

El lodo y/o biosólido generalmente es dispuesto en rellenos sanitarios, sin embargo, pueden causar efectos nocivos sobre la salud dada las condiciones de lixiviación que presenta el material, especialmente porque el contenido de nitrógeno puede contaminar los cuerpos de agua y el suelo al ser absorbido por las plantas (Lara Pérez, 2016), además de que el olor causa problemáticas de salubridad pública.

Por consiguiente, la presente investigación está encaminada en la viabilidad y alternativa de incorporación de biosólido como material para la fabricación de ladrillos en el sector de la construcción como en la reducción del factor de riesgo de contaminación ambiental. Las ventajas que se generan son la prevención de contaminación de los cuerpos de agua y en el suelo, reducción en los malos olores, no reproducción de insectos como moscos, mocos, roedores, entre otros, (Lara Pérez, 2016) y el aumento en la resistencia de los mampuestos.

Por lo tanto, el uso secundario del residuo (lodo o biosólido) contribuye con los objetivos del desarrollo sostenible, a la gestión integral de residuos hídricos y a la reducción de contaminación ambiental que produce la elaboración del ladrillo, según (Gonzalez Ferreira, n.d.) cuando se incluye el 25% de biosólido se genera una





reducción de aproximadamente un 12% y un 17% en el agotamiento del ozono y el efecto de acidificación.

Para lograr el objetivo de la investigación se divide la misma en 4 capítulos: 1. Lodos o Biosólidos como Materia Prima Para la Fabricación de Materiales de Construcción (Ladrillos), 2. Metodologías Dentro del Proceso de Fabricación de Ladrillos, 3. Métodos, Normas Y Ensayos Para Evaluar La Calidad De Los Ladrillos, 4. Resultados De Incorporar El Lodo o Biosólido Como Materia Prima Para La Fabricación de Ladrillos.

Los resultados de la investigación son positivos para el uso y disposición alternativo del residuo debido a que la adición a la pasta cerámica del lodo o biosólido en un 5% a un 25 %, mejora las propiedades mecánicas a causa de la vitrificación de los minerales de su estructura interna y a la inmovilización de los metales pesados, además de mejorar las condiciones de temperatura de cocción.





2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Realizar un estudio detallado sobre investigaciones que proponen el aprovechamiento de biosólidos o lodos generados por el tratamiento de las aguas residuales, como en la fabricación de materiales de construcción: caso de estudio ladrillos.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1.** Delimitar aspectos técnicos y ambientales evaluados en las investigaciones que proponen la utilización de los lodos o biosólidos como materia prima para los materiales de construcción.
- 2.** Definir que metodologías se están utilizando para los procesos de fabricación del ladrillo (materias primas, mezcla, conformado, secado y cocción).
- 3.** Establecer los métodos, normas y ensayos que se deben realizar para evaluar la calidad de los ladrillos como material de construcción con base en normas técnicas colombianas.
- 4.** Analizar los resultados de diferentes investigaciones que permitan establecer desde el punto de vista técnico y ambiental la viabilidad de usar lodos o biosólidos como materia prima para la fabricación de ladrillos.





3. CAPITULO 1: LODOS O BIOSÓLIDOS COMO MATERIA PRIMA PARA LA FABRICACIÓN DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN (LADRILLOS)

La industria de la construcción civil, caso particular, la producción de materiales cerámicos, constituye una de las áreas más efectivas para la reutilización de residuos procedentes del tratamiento del agua residual debido a los volúmenes de material que exige el sector (Quaranta, N., Caligaris, M., López, H., Unsen, M. y Lalla, 2009), siendo los más extendidos los conocidos como ladrillos de arcilla cocida que a nivel mundial producen alrededor de 1500 mil millones de unidades de mampuestos por cada año, lo que implica más de 4000 millones de toneladas de extracción de arcilla procesada por más de 100.000 hornos a gran escala con chimeneas fijas (Fuentes Molina et al., 2017).

Por lo tanto, el descubrimiento de nuevos materiales en la industria de la construcción conlleva a brindar una mejor relación con el medio ambiente dado que representa el 25% de los residuos sólidos según las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (Muñoz V. et al., 2016), de modo que el uso de lodos o biosólidos en ladrillos se convierte en una alternativa innovadora de reutilización, en razón de que la inertización o mineralización al incinerar este material desarrolla matrices cerámicas aptas para la construcción (Fuentes Molina et al., 2017).

Se dice que en Colombia se produce alrededor de 274 Ton de lodo o biosólido al día (Tabla 1), procedentes el 265.53 Ton/día de las plantas de tratamiento el Salitre (Bogotá), Cañaveralejo (Cali) y San Fernando (Medellín), con un valor energético de 2000 y 4000 kcal por Kg de biosólido (Vélez Zuluaga, 2007) debido al porcentaje que se deshidrata es hasta aproximadamente un 30% de materia seca (Benlalla et al., 2015).

Tabla 1. Biosólido producido en Colombia al día

Biosólido Base Seca	Biosólido Base Húmeda	Biosólido Total
94 Ton/día	180 Ton/día	274 Ton/día

Fuente: Autor.

Sin embargo, no se cuenta con mecanismos de manejo y disposición adecuados de los residuos de la PTAR que sean acordes con las necesidades ambientales, contra produciendo un proceso complejo debido a su composición química (90 % contenido de humedad, 0.5-12 % de material orgánica, nutrientes, trazas de elementos metálicos) y microbiológica (Fuentes Molina et al., 2017), por lo tanto, requiere de

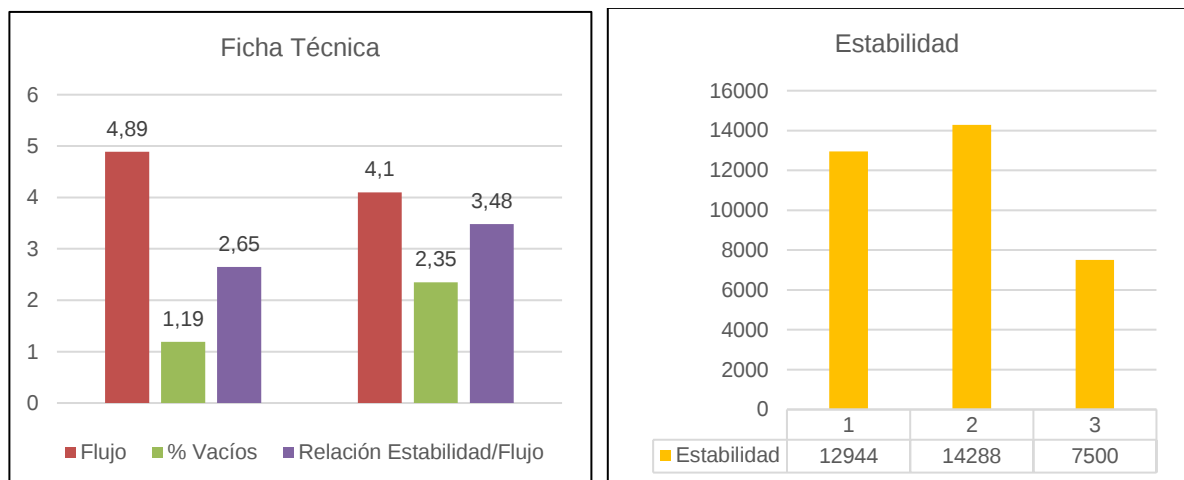




un tratamiento moderado para la eliminación y aprovechamiento del mismo, teniendo en cuenta su clasificación (Categoría A, Categoría B) para identificar si por las características tóxicas y el grado de concentración requiere de un tratamiento y control estricto o no son potencialmente peligrosos (Quaranta, N., Caligaris, M., López, H., Unsen, M. y Lalla, 2009).

La utilización de los biosólidos como material de construcción resulta ser una alternativa viable para resolver problemáticas ambientales e impactos ocasionados sobre las fuentes hídricas, el suelo y la salud de las comunidades aledañas al sector, como se identifica en la investigación realizada por (Lara Pérez, 2016) quien evaluó una alternativa de valorización para el biosólido de la Planta de tratamiento el Salitre usándolo como sustituto parcial o total del filler en la elaboración de mezclas asfálticas tipo MDC 19, bajo el ensayo de Marshall determino el porcentaje óptimo de asfalto siendo del 4.6% para un nivel de transito 2 en capa de rodadura, la mezcla que cumple las exigencias dadas en la norma INVIAS, siendo el porcentaje más optimo el 50% ceniza de biosólido y 50% filler, los resultados mejoran las propiedades de estabilidad y capacidad del asfalto para resistir el desplazamiento y deformación (Figura 1), además de disminuir el espesor en $0.1 \times 10^9 \text{ N/m}^2$, mientras que en la investigación realizada por (Ditterich Baron & Duque Velasquez, 2020) este valor es del $0.3 \times 10^9 \text{ N/m}^2$, con un 5% de porcentaje óptimo de asfalto bajo las mismas proporciones optimas de mezcla, sin embargo el biosólido valorizado es proveniente de la planta de tratamiento de agua cruda de Acacias Meta.

Figura 1. Ficha técnica broquetas con 50% biosólido.



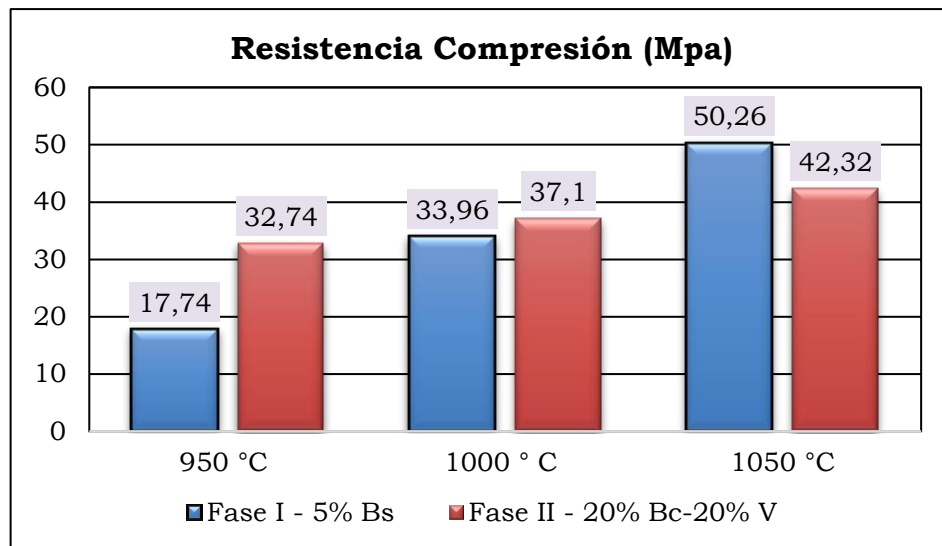
Fuente: Autor.





Por otra parte, (Mozo Moreno, 2021) reutilizo y optimizo los resultados de implementar biosólido, biosólido seco y en ceniza de la planta de tratamiento de agua residual el salitre en una primera fase con 300 especímenes, donde obtiene como resultado (Figura 2) que el biosólido seco al 5% a una temperatura de 1050 ° C reporta una resistencia a la compresión de 50.26 Mpa, sin embargo, este solo cumple para mampostería no estructural en las condiciones de absorción de agua, por lo cual para la segunda fase se realiza la inclusión de vidrio molido y ceniza de biosólido en la pasta cerámica, lo que conlleva a que se mejorarán las condiciones de resistencia a la compresión a una menor temperatura, la proporción de agua fue menor que en la fase I, por lo tanto, se genera una reducción en la plasticidad y menor contracción lineal; el porcentaje óptimo es de 20% ceniza de biosólido, 20% vidrio y 60% arcilla a una temperatura de 950 ° C, con resistencia de 32.74 Mpa y tasa inicial de absorción de agua de 0.12 (g/cm² /min).

Figura 2. Resultados Resistencia a la compresión Fase I y Fase II.



Fuente: Autor.

En Bogotá (Manuel & Lozano, 2016) realizó la evaluación técnica, económica y ambiental de lodos provenientes de la PTAR de la compañía internacional de alimentos agropecuarios (CIALTA S.A.S) como alternativa de aprovechamiento para producción de ladrillos cerámicos en porcentajes de un 10%, 20%, 30%, 40% y 50 % a temperatura de 1200°C, sin embargo, los ladrillos que cumplen las condiciones de resistencia a la compresión, absorción de agua son los del 10%, dado que a mayor porcentaje y temperatura los especímenes comienzan a presentar agrietamientos.





En (Wolff et al., 2015) quien buscaba minimizar los impactos de los residuos industriales utilizando lodos de la planta de tratamiento de agua residual de una fábrica de celulosa en Brasil con granito en la fabricación de ladrillos, para lo cual utilizaron el diagrama de Winkler para la producción de masa con tamaño de partícula menores a 1.2 mm, evidenciando un mejor comportamiento a los 1050°C en la mezcla H(85% Lodo WTP, 15% Granito) con resistencias a la flexión de 52 Kg/cm² que indica según la normativa del país que pueden ser utilizados en la fabricación de tejas o ladrillos macizo dado que está por encima de los 30 y 20 Kg/cm² respectivamente.

En Cusco Perú, (Huillcaya Mendoza & Vidal Chavez, 2018) dan a conocer el uso alternativo del biosólido de la Ptar San Jerónimo determinando como porcentaje optimo el 10% de inclusión en la elaboración de ladrillos y pilas de albañilería con resistencia a la compresión de 115.85 kg/cm² y un 18% de absorción generando se un aumento en un 18.44% de la resistencia a la compresión de los ladrillos base.

En Taiwan (Lin & Weng, 1997) tomo una muestra de lodo residual deshidratado de una planta municipal de tratamiento de aguas residuales en el sur de Taiwán para fabricar ladrillos con ceniza de lodo en porcentajes de contenido de 20 a 40% en peso, con un contenido de humedad óptimo de 13 a 15%, donde obtuvieron resultados de resistencia mayor que el base (100% arcilla) con un 10% de inclusión, es decir, 255 Kg/cm² y en (Weng et al., 2003) fabricaron ladrillos a partir de lodos secos recogidos de una planta local de tratamiento de aguas residuales, donde de las pruebas indicaron que el aumento del contenido de lodo produce una disminución de la contracción, la absorción de agua y la resistencia a la compresión de los ladrillos, por lo tanto, determinaron una mezcla optima con 10% lodo seco, 24% humedad a 1000°C, obteniendo una resistencia a la compresión de 225 Kg/cm², las dos investigaciones dan como resultado ladrillos de primera clase dado que aportan resistencias a la compresión por encima del rango estipulado por la normativa china, es decir, 150kg/cm².

En Francia (Benlalla et al., 2015) evaluaron el efecto de la incorporación de lodos de tratamiento de aguas (LTA) de la planta Bouregreg en la fabricación cerámicos incorporando del 5 al 30%, con rangos de cocción 800, 900 y 1000 °C, donde recomiendan para producir un ladrillo de buena calidad un 20% de lodos en los ladrillos, con un contenido óptimo de humedad del 30% y cocidos entre 900 °C y 930 °C.





4. CAPITULO 2: METODOLOGÍAS DENTRO DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DE LADRILLOS

En el proceso de fabricación de ladrillos con biosólido o lodo se implementa principalmente agua, arcilla y aditivos como biosólido, lodo seco, lodo, ceniza de lodo e inclusive se están incluyendo otras materias primas como lo son el vidrio molido (González Lozano & Ponce Peña, 2012), cenizas volantes (Rojas Pulido, 2015), fibra de Palma africana (Departamento et al., 2018), lodos de curtiembre (Juel et al., 2017), cenizas producto de la combustión de orujo de oliva (Eliche-Quesada & Leite-Costa, 2016), granito (Wolff et al., 2015), residuos de vidrio y lodos galvanizados (Zhang et al., 2018), son algunos ejemplos de residuos usados.

4.1 MATERIALES

Tratamiento de Aguas Residuales

La purificación del agua mediante el uso de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), generan lodos producto de la depuración que en su mayoría son arrojados a los sistemas de alcantarillado, generando problemas para la salud humana, así como para especies de plantas y animales debido a la presencia de compuestos tóxicos como los metales pesados, (Hurtado, 2015).

Figura 3. Proceso de Aireación de la Planta de Tratamiento de Agua Residual, Paipa.



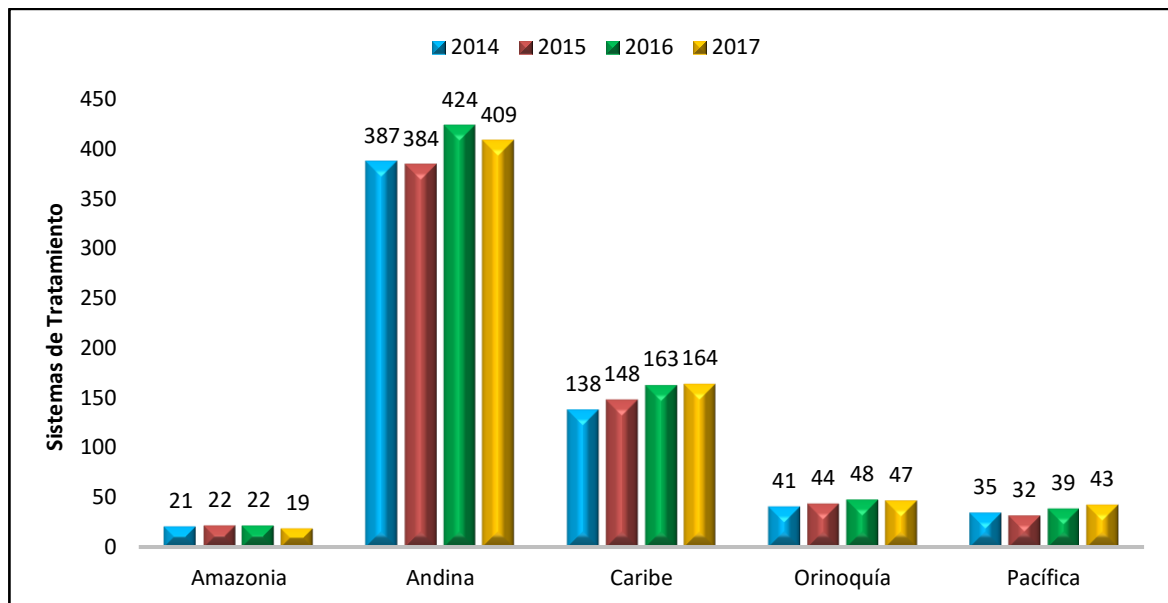
Fuente: Autor.





El primer sistema de tratamiento fue de carácter anaerobio, por medio de un pozo séptico en 1887 Talbot de Urbana (Illinois) le colocó baffles a dicho pozo y en 1905 Karl Imhoff, ingeniero alemán separa las dos fases del proceso: sedimentación y digestión, mientras que en Colombia la primera planta de tratamiento de aguas residuales fue construida en 1.933 en Bogotá (Pineda Buitrago, 2017), desde entonces el sistema de tratamiento se ha ido implementando con mayor auge.

Figura 4. Sistemas de Tratamiento de Agua Residual por Región 2014-2017.



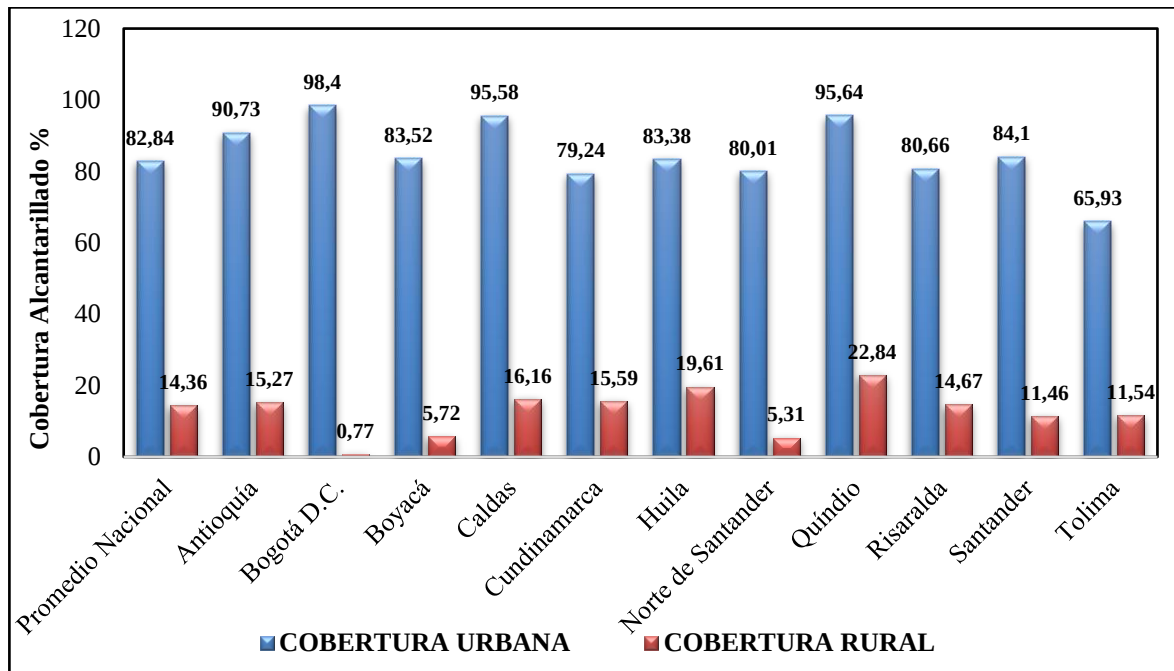
Fuente: Autor, adaptado de (Pacheco García, 2019)

Una de las regiones de Colombia que cuenta con mayor cantidad de sistemas de tratamiento es la región Andina pero su problemática se basa en la cobertura rural en el sistema de alcantarillado debido a que es muy escasa como se evidencia en los departamentos que la conforman (Figura 4). En base a las gráficas en comparación con las 4 regiones del país, se cuenta a nivel nacional con un déficit muy grande a la fecha, así como se evidencia en la región de la Amazonía (Figura 1), sumado a las grandes toneladas de lodo que se generan en las plantas de tratamiento de agua residual y de agua potable.





Figura 5. Porcentaje de Cobertura del Servicio de Alcantarillado en la Región Andina para el año 2018.



Fuente: Autor, adaptado de (Castillo et al., 2019)

Biosólido

Los biosólidos son esencialmente materia orgánica que se conocen desde el siglo XIX (Vélez Zuluaga, 2007) su producción se genera en la planta de tratamiento de agua residual como consecuencia de la depuración del agua cruda, se pueden identificar como aprovechables, no aprovechables y peligrosos, según la normativa colombiana vigente (Decreto 1287 del 2014) se clasifican en categoría A y categoría B, con el fin de realizar su previa disposición y/o aprovechamiento de manera adecuada, debido a la presencia de características nocivas para el ser humano y los ecosistemas.

En la actualidad a nivel mundial se genera tonelada de este producto, en Victoria, Australia se producen alrededor de 95,638 Ton secas de biosólidos anualmente, esto se suma a aproximadamente 3 millones de toneladas secas de biosólidos existentes (Ukwatta et al., n.d.) en la planta de tratamiento de Taiwán se producen 160 Ton/mes de biosólidos (Lin & Weng, 1997), mientras que en Colombia debido a que el tratamiento de aguas residuales es relativamente reciente se generan 274 Ton/día, proceden principalmente de las grandes ciudades como Medellín en donde





la PTAR de San Fernando produce actualmente unas 70 Ton/día de biosólido por cada 1.100 Ls-1 (Vélez Zuluaga, 2007).

Figura 6. Lodo del lecho de secado del reactor UASB, tanque Imhoff y del digestor de lodos, Ptar Municipio de Sotaquirá



Fuente: Autor.

Del mismo modo los biosólidos son considerados como residuos sólidos, su empleo depende de su sometimiento a procesos de estabilización anaerobia y aerobia, para propiciar un impacto positivo en su uso como alternativa para mejorar las condiciones de los suelos en la agricultura o en la combustión de recobro de energía por su alto nivel calorífico.

Adicionalmente, las investigaciones han desarrollado diferentes formas de aprovechamiento como en Región Metropolitana de Chile mediante un cuestionario a distintos expertos se determinó el uso y disposición del biosólido por medio de una cartografía basándose en las tendencias de uso en diferentes países, donde los resultados de la evaluación la disposición final en la zona es de uso forestal, rehabilitación tranques de relaves, extracción de áridos, uso agrícola y por último del plan de cierre rellenos sanitarios (Erazo Lynch, 2007). En Bogotá se emplean cenizas de biosólido de la Ptar el salitre como sustituyente de materia prima en adoquines de concreto (Pérez Alarcón, 2016).

Una de las disposiciones del lodo o biosólido investigado actualmente es la inclusión porcentual como aditivo en materiales de construcción como lo demostró Tay y





Show en 1999, al presentar en sus estudios un resumen de cómo utilizar lodos en ladrillos de construcción y la implementación de lodo con polvo de piedra caliza en la producción de biocemento, (Lin & Weng, 1997).

Arcilla

La arcilla es un agregado de origen mineral, compuesto esencialmente de silicatos y feldespatos que comúnmente se encuentran acompañados de otros minerales como hierro, calcio, magnesio y titanio (Ruben Enrique Garces Aguilar, 2017) concurridos frecuentemente por materia orgánica; su composición mineralógica determina la resistencia y el comportamiento de los procesos a los que se destine, por ejemplo, la abundancia de colinita mayor al 20% genera un aumento de la resistencia a la cocción, aporta una baja plasticidad, aunque la resistencia mecánica sea relativamente baja (Bernal et al., 2003).

4.2 MÉTODOS

Las cerámicas se fabrican con permisos de emisiones cero, para reciclar todos los subproductos y las piezas de residuos derivados de tratamientos de depuración tales como cal agotada, lodos de acristalamiento y lodos de pulido (Andreola et al., 2016). Los métodos que emplean en la fabricación de mampuestos realizadas por los investigadores son comunes y especiales, para determinar la viabilidad ambiental y técnica que proporciona el incluir aditivos como el lodo o biosólido.

Autores de investigaciones a analizar:

1: (Ottosen et al., 2020), 2: (Ukwatta et al., 2018), 3: (Mohamed et al., 2020), 4: (Ukwatta & Mohajerani, 2017b), 5: (Lin & Weng, 1997), 6: (Ukwatta et al., 2016), 7: (Mozo et al., 2015), 8: (Ukwatta & Mohajerani, 2017a), 9a: (Lin & Weng, 1997), 9b: (Weng et al., 2003), 10: (Fuentes Molina et al., 2017), 11: (Chang et al., 2020), 12: (Wolff et al., 2015), 13: (Benlalla et al., 2015), 14: (Huillcaya Mendoza & Vidal Chavez, 2018), 15: (Manuel & Lozano, 2016), 16: (Cuti & Urbina, 2018), 17: (Fuente Molina et al., 2019), 18: (Mozo & Gomez, 2016), 19: (Orellana, 2015), 20: (Ukwatta et al., 2015), 21: (Juel et al., 2017), 22: (Pitiye et al., 2014), 23: (Cotes et al., 2013), 24: (Mozo et al., 2019), 25: (Lagos Pirajan & Ayala Navas, 2018), 26: (Mozo Moreno, 2021).

4.2.1 Selección de los porcentajes de las adiciones y las temperaturas de cocción de los ladrillos cerámicos.





Los porcentajes de adición se determinan por medio relaciones de peso (Tabla 2) como lo realizaron las siguientes investigaciones:

Tabla 2. Porcentajes Optimos para la mezcla.

ITEM	PORCENTAJES OPTIMOS (BIOSÓLIDO)				
	2	4 ETP	4 WTP	8	18
% Biosólido	25	25	25	10	15
% Agua	23.16	29.1	12.7	18.2	21.5
% Arcilla	75	75	75	90	85

ITEM	PORCENTAJES OPTIMOS (BIOSÓLIDO)			
	20	22	24	26
% Biosólido	25	25	20	5
% Agua	17	45.5	-	19
% Arcilla	75	75	80	95

ITEM	PORCENTAJES OPTIMOS DE (BIOSÓLIDO SECO)		
	6	7	26
% Biosólido	15	10	15
% Agua	23	20	19
% Arcilla	85	90	85

ITEM	PORCENTAJES OPTIMOS (LODO SECO)								
	3	9	12	13	15	16	19	21	23
% Biosólido	50	10	100	5	5	5	10	10	15
% Agua	35	24	61	10	8.6	21.32	15	21	10
% Arcilla	50	90	-	95	90	95	90	90	85

ITEM	PORCENTAJES OPTIMOS DE (CENIZA BIOSÓLIDO)			
	10	17	26	25
% Biosólido	15	10	15	10
% Agua	-	-	19	17
% Arcilla	85	90	85	90



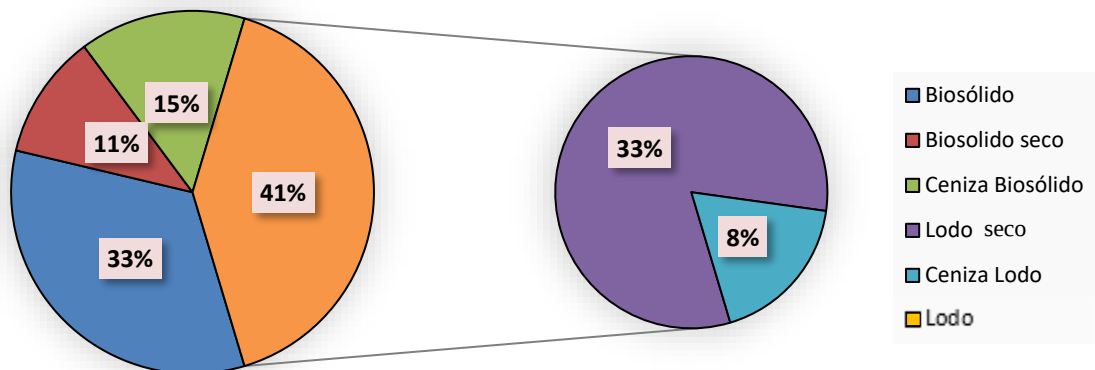


ITEM	PORCENTAJES OPTIMOS (CENIZA LODO)	
	1	5
% Biosólido	10	20
% Agua	10.20	13
% Arcilla	90	80

Fuente: Autor.

Se evidencia que el 59.25 % de los investigadores usan biosólido en diferentes condiciones, mientras que el 40.74 usa lodo deshidratado o en ceniza (Figura 7), por otra parte, realizan inclusión de biosólido o lodo en un 0% hasta un 100%. El incremento del porcentaje de agua se ve reflejado en un aumento dependiente de las características e inclusión de este residuo de la depuración del agua residual, mientras que el porcentaje de arcilla se mantiene alto.

Figura 7. Porcentaje de uso de lodo y biosólido.

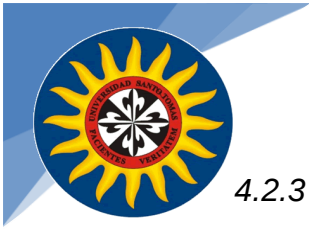


Fuente: Autor.

4.2.2 Dimensionamiento.

En base a la normativa Colombiana NTC 296 se deben establecer las dimensiones modulares para la elaboración de ladrillos según el tipo de mampuesto.





4.2.3 Molienda.

Las arcillas y el lodo o biosólido secos se pasan por un por un molino de martillo según (Bush Yonnathan, 2015) o un pisón metálico como lo realiza en autor (Afanador et al., 2013), con el fin de reducir en el tamaño de las partículas y obtener un comportamiento homogéneo bajo una misma distribución granulométrica.

Para obtener una mezcla uniforme en las partículas que componen la pasta cerámica, (Fuentes Molina et al., 2017) obtiene un tamaño de 70 μm hasta 1 mm y tamiza las materias primas con tamiz N° 200 al N° 18.

4.2.4 Tamizado.

Se realiza un ajuste granulométrico según las partículas grandes que componen la mezcla con el fin de obtener una clasificación geomecánica más adecuada y similar a las características de la arcilla.

En (Cutí & Urbina, 2018) realizan el tamizado por medio de un molino mecánico de rodillos hasta obtener aproximadamente 4.7498 mm de diámetro para formar zonas topo-químicas de mayor reactividad arcillosa por la presencia de granos menores en las proporciones de la mezcla, mientras que en (Ukwatta & Mohajerani, 2017b) utilizan un analizador de tamaño de partículas Malvern Mastersizer X para obtener el contenido de limo y arcilla, mientras que el contenido orgánico lo determinan de acuerdo con el método de la norma británica BS 1377-3.

4.2.5 Agua en la mezcla.

Depende de las caracterizaciones de las materias primas y los resultados obtenidos en los límites de Atterberg y en el Proctor estándar para obtener el porcentaje de agua que aporta a la mezcla la plasticidad adecuada según el proceso de conformado (Quaranta, N., Caligaris, M., López, H., Unsen, M. y Lalla, 2009), para obtener una homogenización e impedir una pérdida en las materias primas se usan bolsas herméticas, como las investigaciones realizadas por: (Ottosen et al., 2020), (Ukwatta et al., 2018), (Ukwatta et al., 2016), (Lagos Pirajan & Ayala Navas, 2018) (Mozo Moreno, 2021), (Ukwatta & Mohajerani, 2017a) y (Pitiye et al., 2014).

4.2.6 Mezcla o Pasta Cerámica.

La mezcla puede ser homogenizada mediante el amasado de forma manual o mecánica por medio de las siguientes herramientas o equipos: mezcladora, molino





de paletas, máquina extrusora o torta de mezcla, cada proceso posee una secuencia específica y su propio tiempo de mezclado (Departamento et al., 2018).

Las materias primas caracterizadas se adicionan poco a poco a la mezcla junto con el porcentaje de agua óptimo determinado en el ensayo de compactación humedad óptima conocido como OMC durante 15 min, en (Orellana, 2015) suministran el agua potable a la mezcla con precaución hasta obtener una humedad uniforme, luego la mezclan nuevamente durante 15 min en una máquina extrusora, para dividir el material en diferentes capas en base a las diferentes dosificaciones como lo realizó (Huillcaya Mendoza & Vidal Chavez, 2018).

En (Bush Yonnathan, 2015) preparan la mezcla de forma manual, se amasa y se almacena como lo realizó (Benlalla et al., 2015) y (Fuente Molina et al., 2019) mediante el uso de bolsas plásticas durante un día para lograr una distribución homogénea de la humedad, posteriormente se dejan reposar al aire libre por espacio de 5 horas (González Lozano & Ponce Peña, 2014) manteniendo el aire saturado de agua para producir mejor trabajabilidad, asentamiento y fluidez en el proceso de obtención de las matrices cerámicas (Fuente Molina et al., 2019). Una vez logran la consistencia adecuada de la mezcla la vierten en el molde para dar forma a los especímenes de prueba; durante el vaciado de mezcla en el molde ejercen presión sobre la masa con el fin de evitar la aparición de vacíos por falta de material en las esquinas o aristas de los ladrillos debido a que se evidenciarían más tarde en el proceso de desmoldeo, provocando que el proceso se repita hasta lograr un ladrillo bien definido (Rojas Pulido, 2015), por consiguiente, el tamaño de partícula similar a la arcilla forma zonas topo-químicas de mayor reactividad arcillosa mejorando las condiciones de moldeo. Para expulsar el aire de la mezcla, utilizan una máquina de vacío y evitan que se generen agrietamientos o los inconvenientes ya mencionados (Fuentes Molina et al., 2017).

4.2.7 Conformado.

El proceso de conformado se utiliza con el fin de proporcionar la forma al mampuesto y consistencia a la pasta mediante el aumento de la densidad para mejorar las propiedades mecánicas del mismo (Aguilar Gutierrez, 2019). Las técnicas utilizadas son compactaciones, extrusión o vibrado, se puede suministrar como dextrina blanca como ligante en una cantidad del 1% en peso (Ayesta et al., 1999) o talco como lubricante para facilitar el desmolde del espécimen.

(Aguilar Gutierrez, 2019) y (Mozo Moreno, 2014) utilizan el prensado uniaxial por medio de una máquina de compresión marca “ELE international” EL36- 4140/01, para aplicar un esfuerzo de compresión de 60 kgf/cm², mientras que en (Eliche-Quesada & Leite-Costa, 2016) realizan el conformado por compresión en semiseco a una presión de 54,5 MPa en un prensado Mega KCK-30 A.





En (Cuti & Urbina, 2018) el material húmedo se sitúa en la tolva que pasa por un tornillo sin fin para empujar al material a través de una boquilla, generando un bloque rectangular de la mezcla a presión.

En (Wolff et al., 2015) conforman la pasta cerámica por extrusión a una presión de 91 kPa por medio de una extrusora de vacío 050 C, mientras que en (Wolff et al., 2015) se realiza la extrusión sin vacío con aparato neumático y en (Dondi et al., 2009) la extrusión se realiza por barras de plástico de 100 x 20 x 10 mm³. En (Departamento et al., 2018) se compacta a presión por medio de vibraciones controladas hasta obtener una película de agua en la superficie.

Por otra parte, cuando se realiza un proceso artesanal de moldeo en la producción de ladrillo, se compactan con las manos, se retira el excedente con un rasero que es un palo cilíndrico (Ruíz Fernández, 2015) o una espátula, como lo realizó (Orellana, 2015) aplicando el método de compactación a mano o de forma mecánica como (Bush Yonnathan, 2015).

Tabla 3. Tipo de Conformado Utilizados en la Revisión Bibliográfica.

Tipo Conformado								
1	2	3	6	21	23	25	25	26
Prensado	Uniaxial	Prensado	Prensado	Prensado	Extrusión	Uniaxial	Uniaxial	Uniaxial

Fuente: Autor.

El método más implementado en la revisión bibliográfica (Tabla 3) es el Prensado y el Prensado Uniaxial en un 88.88%, dado que la extrusión disminuye la resistencia del ladrillo (Cotes et al., 2013).

4.2.8 Secado.

El proceso de secado se genera cuando elimina parte del agua de la pieza de ladrillo de forma natural dadas las condiciones climáticas de la región (Ruíz Fernández, 2015) o artificial cuando se secan las muestra mediante un horno controlando el tiempo, temperatura y flujo de aire (Aguilar Gutierrez, 2019), con el fin de minimizar el contenido de humedad, (Araujo et al., n.d.).

En este proceso de secado involucran dos fenómenos físicos, la transferencia de calor y la transferencia de masa para generar un equilibrio térmico (Ruíz Fernández, 2015), es decir, que la pieza está seca cuando permanece a peso constante después de un prolongado tratamiento a una temperatura de 75°C (Frans et al., n.d.); en el método tradicional es el secado al sol durante 3 días (González Lozano & Ponce Peña, 2014).





Modelos de secado

- a) Modelo de Luikov. Permite conocer los coeficientes en los perfiles de secado y determinar el mecanismo de transferencia de humedad que controla el proceso, mediante una serie de ecuaciones de segundo orden que describen la transferencia de calor y humedad en los materiales capilares – porosos, (Martínez López & Lira Cortés, 2016).
- b) Sistema de Keller. Es un proceso de secado artificial por flujo continuo donde los cationes de Na^+ , K^+ , Mg^{2+} o Ca^+ resultante de la sustitución isomorfa del mineral favorecen la capacidad de absorber agua, potenciando la propiedad higroscópica de la arcilla la cual al salir de la cámara de secado (Rubén Enrique Garces Aguilar, 2017).
- c) Curvas de Bigot. Ilustran el comportamiento durante el proceso de secado, relacionando el tiempo y la pérdida de masa en las siguientes fases:
- Se mantiene una velocidad de secado y de evaporación constante con el fin de obtener la superficie del ladrillo húmeda hasta alcanzar el punto crítico, hasta que la pieza no contenga agua en la superficie y cambie de color dada esta circunstancia (Frans et al., n.d.).
 - La tasa de evaporación disminuye, provocando la formación de poros al contraerse ligeramente la mezcla, luego se crea un gradiente hidráulico al interior del ladrillo por una contracción no proporcional (Frans et al., n.d.).
 - Ocurren variaciones en las dimensiones del ladrillo hasta que los poros después de la evaporación del agua intersticial sean eliminados, por ende, la humedad del cuerpo se vuelve fija y queda en la masa del cuerpo (Frans et al., n.d.).

La temperatura más implementada en la fase de secado en base a la revisión bibliográfica (Tabla 4), es de 105 °C en un 82.61%, 110°C en un 8.69%, 103°C en un 4.35% y temperatura ambiente en un 4.35%.

Tabla 4. Ciclo de Secado.

IETM	SECADO											
	1	2	3	(WTP) 4 (ETP)	5	6	7	8	9	10	12	
T° Secado	105	105	105	105	105	105	105	105	105	103	105	110
t (hr) secado	24	24	24	24	24	24	24	12	24	24	12	24





Secado en verde	Aire	Aire	-	-	Aire	-	Aire	-	-	Aire
T (hr) maduración	48	48	-	-	48	-	48	-	-	24

IETM	SECADO														
	13	15	16	18	19	20	21	22	23	24	25	(BC – BS)	26 (B)		
T° Secado	105	105	105	105	Ambiente	105	105	105	110	105	105	105	105	105	
t (hr) secado	24	72	24	2	360	24	48	48	48	36	36	36	36	36	
Secado en verde	-	-	-	-	-	-	Aire	Aire	-	-	-	Aire	Aire	Aire	
T (hr) maduración	-	-	-	-	-	-	24	24	-	-	-	12	12	12	

Fuente: Autor.

El secado es uno de los más importantes dado que influye en las propiedades del ladrillo (Ruben Enrique Garces Aguilar, 2017), por ello la curva se compone por 3 rampas de temperatura, cada una de $5^{\circ}\text{C} \times \text{min}^{-1}$, donde los elementos cerámicos en verde se dejan inicialmente a temperatura ambiente y luego se dejan en un horno entre 60°C y 105°C durante 12 ó 24 horas (Aguilar Gutierrez, 2019) con el fin de asegurar un secado adecuado, debido que al secar los ladrillos al sol no se reduce absorción de agua de manera apropiada afectando la durabilidad y resistencia del mismo.

Rampas de Temperatura:

- 1) Hasta los 105°C , conservando un tiempo de 120 minutos con el fin de evaporar la humedad residual.
- 2) Hasta los 600°C , conservando un tiempo 120 minutos con el fin de quemar la materia orgánica (celulosa, lignina, grasas, microorganismos patógenos, etc.) presente en los ladrillos (Manuel & Lozano, 2016).
- 3) Según la temperatura que se defina por ensayos o revisión bibliográfica (Figura 8), como en el caso de (Aguilar Gutierrez, 2019), la tercera etapa alcanzó los 950°C conservándola durante 3 horas, sin embargo, al presentarse una reacción exotérmica se deben dejar enfriar durante 24 o 48 horas a temperatura ambiente por convección natural dentro del horno después de apagado (Pérez-Villarejo et al., 2012).

Se demuestra en la investigación realizada por (Ukwatta & Mohajerani, 2017b) que la velocidad de calentamiento de $1.5 / \text{min}$, ahorra una cantidad significativa de energía en comparación con el uso de velocidades de calentamiento más bajas de





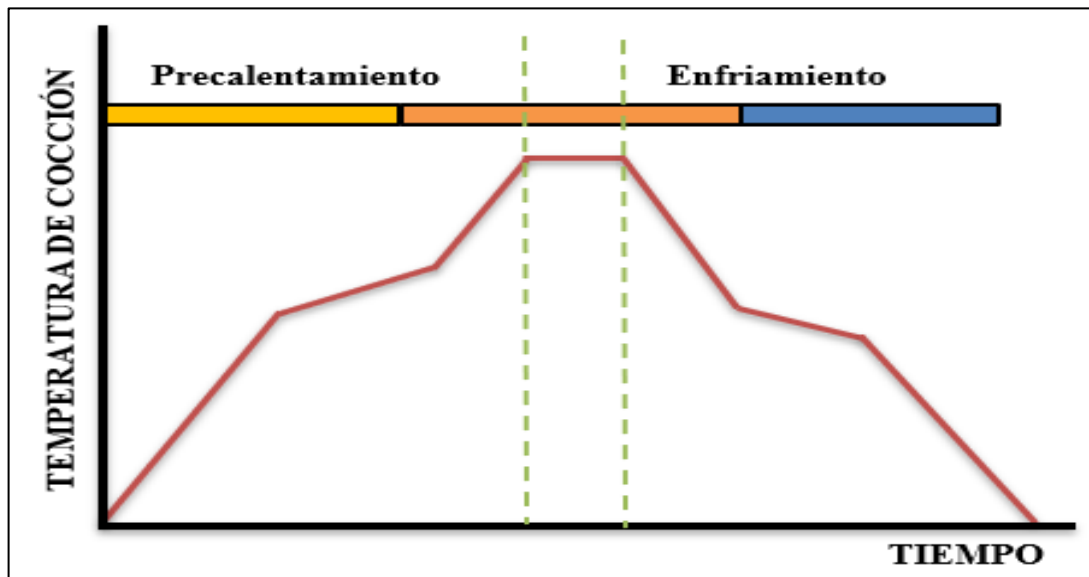
0.7 y 1.0 C / min aportando de esta manera un desarrollo sostenible con el medio ambiente.

4.2.9 Cocción.

Consiste en someter los ladrillos previamente secados a condiciones de temperaturas, según revisión bibliográfica varían entre 800 °C como temperatura mínima de cocción hasta los 1050 °C en hornos de túnel que llegan a medir hasta 120 metros de longitud, hornos eléctricos (Ruíz Fernández, 2015), hornos de mufla de marca TERRIGENO referencia MM15 de control automático (Aguilar Gutierrez, 2019), hornos tradicionales denominados obrador (González Lozano & Ponce Peña, 2014), hornos de combustión continua (Cuti & Urbina, 2018), hornos artesanales construido en ladrillo macizo (Cultrone et al., 2004) o hornos de tubo (Ukwatta et al., 2018).

Para determinar el tiempo de temperatura y la tasa de calentamiento (°C/min), realizan un análisis térmico durante las fases críticas del proceso de cocción (Mozo et al., 2015) como lo son el precalentamiento (100° C), cocción y enfriamiento, como se ilustra (Figura 7) (Ruíz Fernández, 2015), la temperatura debe ser progresiva para cada cámara realizando un control de la velocidad para cada vagón, debido a que el consumo energético se le atribuye principalmente a estos factores (Ruben Enrique Garces Aguilar, 2017).

Figura 8. Ciclo de Cocción de un producto de arcilla.



Fuente: Autor.





El incremento de temperatura durante la cocción conlleva a la creación de poros cerrados (Frans et al., n.d.) que darán lugar a sus propiedades de aislamiento térmico, mientras que los componentes inorgánicos (arcillas, tierras, metales pesados, etc.) quedan implantados dentro en la matriz vítrea del cuerpo cerámico (Manuel & Lozano, 2016) para que adquieran propiedades mecánicas y físicas con valores representativos en comparación con la arcilla sin cocer (Ruíz Fernández, 2015).

En vista de que los ladrillos son sometidos a condiciones de alta temperatura por tiempos prolongados en hornos, (Mozo et al., 2015) realiza el proceso de cocción mayor a los 900 ° C y garantiza la inactivación de microorganismos, según (Pacheco García, 2019) está se produce a temperaturas superiores a los 70°C.

Los valores de temperatura que emplean los autores, es el que tiene como máximo la temperatura en horno (Bernal et al., 2003) y varían en base a la revisión bibliográfica entre los 750 y los 1200 ° c (Tabla 5) para los porcentajes óptimos de la pasta cerámica donde se comporta mejor el espécimen en cuanto a resistencia a la compresión, absorción de agua y tasa inicial de absorción de agua.

Tabla 5. Temperatura óptima de Cocción

IETM	RESULTADOS													
	1	2	3	(WTP) 4 (ETP)	5	6	7	8	9	10	12	24	17	
T° Cocción	1000	1050	900	1050	1050	1000	1020	1050	1050	960	900	950	950	1000
t (hr) cocción	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	7	6	3

IETM	RESULTADOS													
	13	15	16	18	19	20	21	22	23	25	(BC – BS)	26 (B)		
T° Cocción	800	1200	1100	900	750	1100	1000	1100	950	950	950	1000	1050	
t (hr) cocción	3	72	98	3	72	3	3	3	6	6	6	6	6	

Fuente: Autor.

Dentro de los procesos de cocción se implementan diferentes métodos, en la investigación realizada por (Ruben Enrique Garces Aguilar, 2017) se somete el espécimen en un horno durante 3 días con enfriamiento de 20 días, en (Cutí & Urbina, 2018) utilizaron un horno de leña de eucalipto madura para la combustión continua durante 94 horas a temperaturas mayores a los 1000° C con enfriamiento de 4 días, en (Cultrone et al., 2004) implementan un horno artesanal construido en ladrillo macizo y un horno mufla marca Gabrielli modelo C72 con una velocidad de cocción de 1,7 °C/min con el fin de evitar cambios bruscos en la cocción, en





(Betancourt et al., 2013) el quemador es colocado en la parte inferior de un horno pequeño de funcionamiento intermitente con control de temperatura mediante un sensor tipo K marca METRA – 202, en (Bush Yonnathan, 2015) se llevó a cabo una mono cocción a 999°C a una velocidad de 1.2°C/min durante 10 horas para previamente deshidratar el mampuesto durante 1 – 2 horas para que no se produzca choque térmico y en (Ukwatta et al., 2018) se realiza el proceso en un horno de tubo a una velocidad de rampa de $0,7^{\circ}\text{C}$ por minuto desde la temperatura ambiente hasta la temperatura máxima deseada, es decir, 1050°C durante 3 horas, luego los enfrían para después de apagar el horno a temperatura ambiente y someterlos por convección natural dentro del mismo.

Tabla 6. Contenidos de Humedad Residual.

Tipo de Producto	Humedad Residual (%)
Productos con + 35% de vacío	2.5 a 3.0
Productos adaptados a hornos de ciclo de cocción rápida.	0.8 a 1.0

Fuente: Autor, adoptado de (Frans et al., n.d.).

A su vez, según (Frans et al., n.d.) el calor del horno cuando el ladrillo entra en cocción puede ser implementado para remover la humedad residual considerando que el contenido (Tabla 6) entre 0.8 a 1.0 para ladrillos macizos y de 2.5 a 3.0 para ladrillo hueco evita secar el mampuesto más allá de lo necesario al mantener el equilibrio entre la pieza cerámica y el entorno.





5. CAPITULO 3: MÉTODOS, NORMAS Y ENSAYOS PARA EVALUAR LA CALIDAD DE LOS LADRILLOS

5.1 ANÁLISIS MECÁNICO.

El comportamiento mecánico de un ladrillo para mampostería se determina por ensayos de compresión y tracción, (Cultrone et al., 2005) mide la velocidad de propagación de las ondas ultrasónicas utilizando un generador de ultrasonidos Steinkamp PB-5 con transductores de 100 kHz y una prensa Metro Com MI30 con un 3×10^5 kg de capacidad para comprender el comportamiento mecánico y obtienen como resultado una vitrificación progresiva con el aumento de la velocidad de onda a mayor temperatura.

5.1.1 Resistencia a la compresión (R_c)

La resistencia a la compresión es la propiedad más importante para asegurar la calidad del mampuesto como material de construcción, ante capacidad para soportar las cargas, por lo tanto, en la revisión bibliográfica se evidencia que el 7.69% no realiza el ensayo de resistencia a la compresión, mientras que el 92.3 si lo realiza con el fin de determinar el factor de calidad y el uso final del mampuesto (Tabla 7).

Tabla 7. Ensayo de Resistencia a la Compresión.

ITEM	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (✓ Se realiza ensayo. ✗ No se realiza ensayo)												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
RC	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓

ITEM	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (✓ Se realiza ensayo. ✗ No se realiza ensayo)												
	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
RC	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Fuente: Autor

En la investigación realizada por (Mohamed et al., 2020) implementan en el ensayo la máquina MTS (Material Test System) y determinan que con el aumento de lodos o biosólido se reduce la resistencia a la compresión de los ladrillos además de reportar resultados que clasifican los mampuestos en primera y segunda clase según normativa de la república de China CNS382 R2002 análoga a la NTC 4205 (Ukwatta & Mohajerani, 2017b), según (Mozo et al., 2015) y (Juel et al., 2017), la pérdida de resistencia a la compresión se debe al aumento de la porosidad y/o absorción de agua del cuerpo del cerámico afectando el proceso de fraguado.





De acuerdo con los resultados de (Lin & Weng, 1997) las muestras deben cumplir con las condiciones propuestas por la norma australiana AS / NZS 4456, 2003 análoga a la NTC 4017, es decir, la resistencia debe ser superior a los 3 Mpa (Resistencia mínima).

Mientras que en el estudio suministrado por (Huillcaya Mendoza & Vidal Chavez, 2018) logran obtener con un 10% de inclusión de biosólido, ladrillos con resistencias de 115.85 kg/cm², con un 18% de absorción de agua, clasificado en ladrillo tipo III que es el mismo del 0% de inclusión, siendo apto para mampostería estructural.

En consecuencia, para obtener los resultados anteriormente mencionados realizan la prueba de compresión a las muestras de ladrillo según la NTP.070 normativa de Cusco Perú, sujetando el espécimen en lados opuestos para medir la resistencia a una velocidad de carga de 1,25 mm / min, en dirección a la profundidad del ladrillo, como lo propone (Mohamed et al., 2020) al aplicar la carga en la parte mediana mediante una plaza de acero.

En Colombia el procedimiento se realiza bajo lo estipulado en la norma técnica colombiana 4017, por medio del siguiente procedimiento:

1. Establecer los soportes en la cara del espécimen, la platina superior debe estar dotada de una rótula esférica con un bloque de metal endurecido fijado al centro de la cabeza superior de la máquina, en un ángulo de aproximadamente 3° en cualquier dirección (Manuel & Lozano, 2016).
2. Se permite el uso de una platina metálica endurecida debajo del espécimen para minimizar el desgaste del plato inferior de la máquina (Manuel & Lozano, 2016).
3. El centro de la esfera debe descansar en el centro de la superficie del bloque metálico en contacto con el espécimen.
4. Se aplica la carga hasta que la máquina universal registre el último dato de fuerza ejercida en el espécimen, determinado por la fracturación del ladrillo y/o el registro mínimo de variables como tiempo, extensión y fuerza (Manuel & Lozano, 2016) .

En Ecuador se basan en la normativa ecuatoriana NTE-INEN 294 “Ladrillos cerámicos, resistencia a la compresión”, como realizó según (Cuti & Urbina, 2018), que indica que la prensa hidráulica a utilizar es CMH 120 y primero debe ser calibrada, para luego proceder a:

1. Poner una placa metálica de mayor área que el ladrillo.
2. Ubicar y centrar al ladrillo respecto a la placa y rotula.
3. Colocar una segunda placa metálica centrada sobre el ladrillo.
4. Ajustar las placas y el ladrillo.
5. Aplicar la carga hasta que falle el material cerámico.





6. Calcular el módulo de la resistencia a la compresión.

5.1.2 Resistencia a la flexión (M_r)

El ensayo de flexión es conocido como módulo de rotura y es una propiedad que determina la durabilidad y la comprensión del mecanismo de falla de la mampostería (Afanador García et al., 2021) bajo condiciones de esfuerzo a flexión, sin embargo, solo el 15.38% de los autores de las 26 investigaciones analizadas realizan este ensayo (Tabla 8).

Tabla 8. Ensayo Resistencia a la Flexión.

ITEM	RESISTENCIA A LA FLEXIÓN (✓ Se realiza ensayo. ✗ No se realiza ensayo)												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
MR	✗	✗	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✗

ITEM	RESISTENCIA A LA FLEXIÓN (✓ Se realiza ensayo. ✗ No se realiza ensayo)												
	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
MR	✗	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗

Fuente: Autor

El módulo de rotura en Colombia la llevan a cabo en la maquina universal bajo la norma técnica colombiana 4017, con el siguiente procedimiento:

1. Colocar el espécimen con el lado plano hacia abajo.
2. Colocar los soportes, siendo estas barras sólidas de acero de diámetro 25,4 mm +/- 1,0 mm cuyo centro debe estar colocado a 12,5 mm +/- 2,0 mm de cada borde del espécimen, (centro de la luz).
3. La carga se aplica a la cara superior del espécimen mediante una placa de apoyo de acero de 6,0 mm de espesor y 38,0 mm de ancho; su longitud debe ser como mínimo igual al ancho del espécimen.
4. Tomar registros de fuerza aplicada al espécimen, midiendo otras variables como tiempo, posición y extensión, suministrando un dato único de fuerza la ejercida en Newton. (Manuel & Lozano, 2016)

La metodología empleada en Ecuador la realiza bajo la norma ecuatoriana NTE-INEN 295: "Ladrillos cerámicos, determinación a la resistencia a la flexión", utilizando la TRITEST 50 previamente calibrada, por lo cual:

1. Se instala el ladrillo sobre dos varillas de hierro de soporte situados en la cara mayor.





2. La pieza superior de la prensa electrónica desciende aplicando una carga tal que la velocidad del cabezal no supere los 1,5 mm/s.
3. Se aplica una carga progresiva hasta determinar su resistencia máxima admisible, por medio de la rotura del ladrillo.
4. Calcular el módulo de rotura de un ladrillo.

5.2 ANÁLISIS FÍSICO.

Dentro de las características se encuentra en la revisión bibliográfica las siguientes:

5.2.1 Color crudo y en quema, (Tablas preestablecidas de Munsell).

Hue = Value = Tonalidad; identifica la base del color espectral o longitud de onda. **Chroma**, es la intensidad del color, la saturación o la fuerza del color. **Value**, es el grado de iluminación del color en un día, (IGAC, 2017).

5.2.2 Durabilidad

Es un ensayo que consiste en 20 ciclos de 24 horas cada uno para evaluar la durabilidad traducida en tiempo y la afectación del mismo en cuanto a la textura, porosidad y cambio de agua de estado líquido a sólido, es denominado ensayo de congelación-descongelación. En España la metodología la realizan bajo la norma UNE 67-028-84 (Cultrone et al., 2005), análoga a la norma Colombiana NTC 4017 que especifica 50 ciclos, sin que haya roturas o pérdida de masa superiores al 0.5% en relación con el peso en seco (Cultrone et al., 2005).

5.2.3 Granulometría (GRAN)

El ensayo de granulometría es un método de sedimentación realizado para partículas finas pasadas por el tamiz N° 200 (<0.074 mm), mediante el ensayo del hidrómetro con el aplicativo de norma ASTM D6913-04 (2009), ASTM D422, ASTM C325 “Método de tomografía y sedimentación”, ASTM D7928-16 y ASTM D854-14 para Ambato Perú (Figura 10), análoga a la norma colombiana INV E 124-07 (Figura 9), norma estadounidense ASTM D422-63 y norma australiana AS 1289.3.6.1, 2009 “Método estándar de análisis por tamizado, con el fin de determinar la cantidad de partículas en suspensión y las que caen libremente a través del fluido, el hidrómetro usado en (Cuti & Urbina, 2018), fue el ASTM 151H.





Tabla 9. Ensayo de Granulometría.

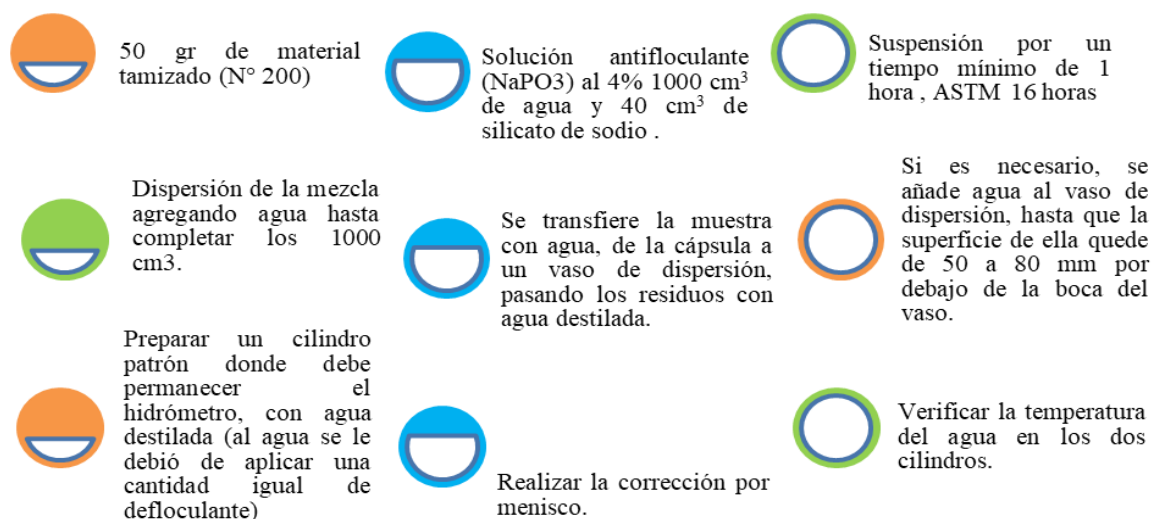
ITEM	GRANULOMETRÍA					✓ Se realiza ensayo. ✗ No se realiza ensayo.							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
GRAN	✗	✓	✗	✓	✗	✓	✓	✓	✗	✓	✗	✓	✗

ITEM	GRANULOMETRÍA					✓ Se realiza ensayo. ✗ No se realiza ensayo.							
	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
GRAN	✗	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✗	✗	✗	✓	✓	✓

Fuente: Autor

Se realiza con el fin obtener un tamaño y la distribución de partículas similares para obtener mejora en las propiedades de plasticidad, porosidad, gravedad específica, homogeneidad, permeabilidad, y penetrabilidad, sin embargo, el 42.30% de los 26 autores elegidos para la evaluación de viabilidad, no suministran datos y resultados del ensayo de granulometría (Tabla 9).

Figura 9. Granulometría por Hidrómetro según norma colombiana (INV E 124 -07).



Fuente: Autor

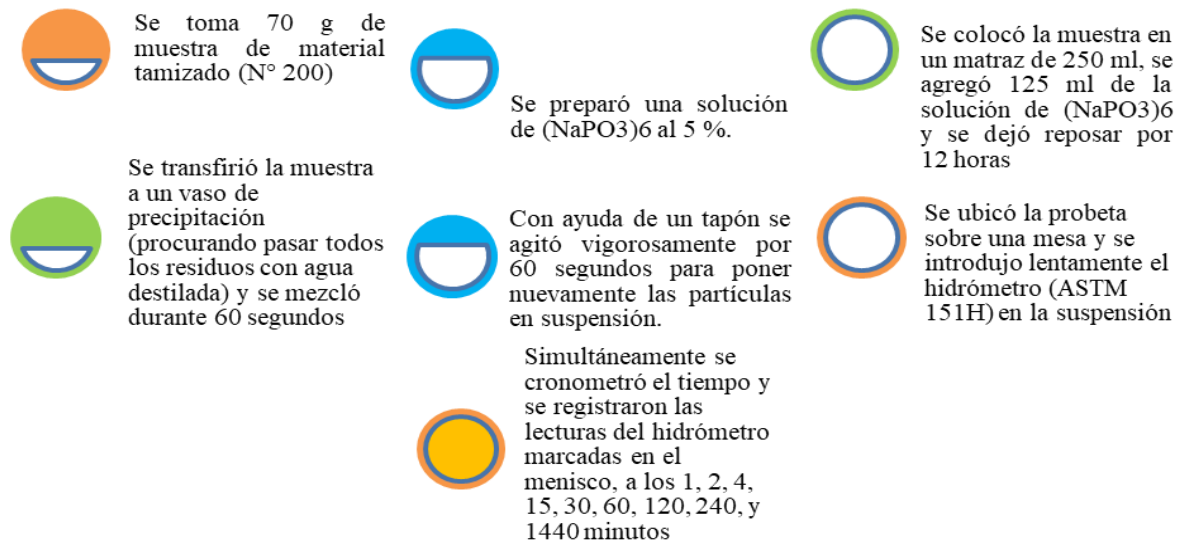
Mientras que para las partículas gruesas en Perú en la investigación (Cuti & Urbina, 2018), la granulometría la realizan por medio de los tamices del W. S. Tyler test Sieve y se basan en la metodología de la norma ASTM D-422, por consiguiente, se lleva a cabo el siguiente procedimiento: Del ensayo del hidrómetro la suspensión se pasa por el tamiz N° 200 (0.074 mm) con el fin de eliminar las partículas finas por medio del lavado, posteriormente pesan un recipiente metálico, suministran el material retenido por el tamiz N° 200 para ser secado en un horno a temperatura de





110 ± 5 °C por 24 horas, registran el peso inicial de la muestra seca y tamizan en forma ascendente por medio de la serie de tamices del W. S. Tyler test Sieve: a) N°200, b) N°100, c) N°40, d) N°20, e) N°10 y f) N°4. El suelo seco lo transfieren al tamiz N° 4 y tapan la parte superior de la serie de tamices, para agitar de forma manual por 15 minutos, luego de dividen las fracciones retenidas en cada tamiz y registran el peso (Cuti & Urbina, 2018).

Figura 10. Granulometría por Hidrómetro según norma ASTM D6913-04 (2009), ASTM D7928-16 y ASTM D854-14, Ambato Perú



Fuente: Autor

5.2.3 Plasticidad – Límites de Atterberg

Es un método utilizado para determinar la plasticidad, como indica Atterberg no es una propiedad permanente, sino circunstancial y dependiente de su contenido de agua (Lara Pérez, 2016), por lo tanto, se convierte en un factor importante ante las propiedades de los suelos arcillosos ante su capacidad expansiva y de sensibilidad, como para obtener las humedades en la cual la masa es moldeables.

Este ensayo permite obtener los límites de la humedad sobre el comportamiento plástico de los materiales para clasificar el suelo en el sistema USCS, según la carta de plasticidad, según la Tabla 10, se determina que el 57.69% realizan análisis físico de plasticidad, en donde se utiliza en Colombia la norma I.N.V E – 125 – 07, en Brasil bajo la NBR 6459, en Australia la AS 1289.1.1, 2001 y en Francia bajo la norma NF P94-051.





Tabla 10. Ensayo Limites de Atterberg.

ITEM	LIMITES ATTERBERG					✓ Se realiza ensayo.				✗ No se realiza ensayo.			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
LIM	✗	✗	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓

ITEM	LIMITES ATTERBERG					✓ Se realiza ensayo.				✗ No se realiza ensayo.			
	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
LIM	✗	✗	✓	✓	✗	✗	✓	✗	✓	✗	✓	✓	✓

Fuente: Autor

Según (Cuti & Urbina, 2018) el valor del índice de plasticidad (IP), es inversamente proporcional a la cantidad de ceniza de lodo o biosólido, es decir, que un valor entre 0-5 y 15-30 muestra que el material es de baja plasticidad, mientras que si es superior a 35 es de alta plasticidad, por ende, se debe proporcionar hasta un 30% de ceniza a la mezcla en la fabricación de ladrillos para no perder el comportamiento plástico según revisión bibliográfica (Lin & Weng, 1997).

- Índice de Plasticidad. Determina la humedad en la cual el suelo presenta una transición entre los estados sólido, semisólido, plástico y líquido. La calculan mediante la diferencia entre los límites de Atterberg ($IP = LP - LL$), (Cuti & Urbina, 2018).
- Límite Líquido. Determina el límite del contenido de humedad entre el estado semilíquido y plástico, (Cuti & Urbina, 2018).

Figura 11. Límite Líquido.



Fuente: Autor.

Procedimiento según revisión bibliográfica:

1. Se toma 200 g de la de la muestra de suelo seco que pasa por el tamiz N° 40 (0,42 mm) del W. S. Tyler test Sieve (Cuti & Urbina, 2018).





2. Se coloca sobre la placa de vidrio, agregando agua (Cuti & Urbina, 2018).
 3. Se mezcla con ayuda de la espátula hasta obtener una mezcla homogénea (Cuti & Urbina, 2018).
 4. Se divide la muestra a la mitad, con ayuda de un ranurador (Cuti & Urbina, 2018).
 5. Se gira la manija de la cazuela a una velocidad constante de 2 golpes por segundo y se cuenta el número de golpes necesario para que la parte inferior de la ranura se cierre (Cuti & Urbina, 2018).
 6. El intervalo de golpes de cada uno de los 3 ensayos debe estar entre 30-40, 20-30 y 15-20 respectivamente (Cuti & Urbina, 2018).
 7. Se toman las muestras de suelo para determinar el contenido de humedad, colocando el material en cápsulas metálicas previamente pesadas (Cuti & Urbina, 2018).
 8. Se pesan las cápsulas con la muestra húmeda (Cuti & Urbina, 2018).
 9. Se llevan al horno (110° C) de 12 a 18 horas y se pesan (Cuti & Urbina, 2018).
- Límite Plástico. Determina el límite del contenido de humedad del suelo en el límite entre los estados semisólido y plástico.

Procedimiento según revisión bibliográfica:

1. Se toma 50 g de muestra de suelo seco que pasó por el tamiz N° 40 (Cuti & Urbina, 2018).

Figura 12. Límite Plástico.



Fuente: Autor.

2. Se pesan dos cápsulas metálicas (Cuti & Urbina, 2018).
3. Se remoja la muestra con agua destilada para formar una pasta plástica (Cuti & Urbina, 2018).
4. Se realizan rollos con un diámetro aproximado de 3 mm de diámetro y 5 cm de largo (Cuti & Urbina, 2018).





5. Se colocan en cápsulas metálicas para determinar su contenido de humedad (%) (Cuti & Urbina, 2018).
6. Se pesa la cápsula con la muestra húmeda (Cuti & Urbina, 2018).
7. Se colocan en el horno durante 18 horas a 110° C (Cuti & Urbina, 2018).
8. Se toma el peso de la cápsula con la muestra seca (Cuti & Urbina, 2018).
9. El límite plástico corresponde al promedio del contenido de humedad (%) determinados en los cilindros (Cuti & Urbina, 2018).

5.2.3 Área de Superficie (SSA)

Es el área de la superficie de todas las partículas que forman un grano de materia (m^2/g) y se mide mediante el valor del azul de metileno para reflejar la actividad de la fracción de material y se basa en la norma francesa Norme Française NF P 94 - 068 AFNOR (1993), en la indagación de (Benlalla et al., 2015) agregan 5 ml de la solución de azul de metileno a la suspensión de arcilla hasta que un halo de tinte azul claro rodee la mancha azul oscuro en el papel filtro. No se considera un ensayo representativo para los autores a analizar en la presente investigación (Tabla 11), dado que solo el 7.69% lo realiza.

Tabla 11. Ensayo de SSA.

ITEM	ÁREA DE SUPERFICIE												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
SSA	✗	✗	✗	✗	✓	✗	✗	✗	✓	✗	✗	✗	✗

Fuente: Autor.

Una apreciación reportada en la revisiones se fundamenta en que a mayor área de superficie en la mezcla, mayor cantidad de agua en el proceso de fabricación de ladrillos y según resultado de (Lin & Weng, 1997) las cenizas de lodo casi alcanzan el mismo orden de magnitud de la arcilla, siendo inversamente proporcional, es decir, que a medida que aumenta la cantidad de ceniza en sustitución de arcilla, el área de superficie disminuye.

5.2.4 Densidad y gravedad específica (Norma ASTM C373 – 82).

La densidad define como la relación masa/volumen de una partícula comparada con densidad del agua a una temperatura determinada y se ve afectada en el proceso de cocción debido a las diferentes reacciones que suceden dentro del cuerpo del espécimen (ladrillo) cuando los poros son llenados completamente por agua y el volumen desplazado de la misma es igual al volumen de la fase sólida se denomina como densidad aparente o densidad neta y es realizada por el 69.23% de las investigaciones relacionadas al presente estudio (Tabla 12), mientras que el ensayo de gravedad específica es realizado por el 23.07% (Tabla 13).





Tabla 12. Ensayo Densidad Aparente.

ITEM	DENSIDAD				✓ Se realiza ensayo.		✗ No se realiza ensayo.						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
DA	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✗	✓	✓

ITEM	DENSIDAD				✓ Se realiza ensayo.		✗ No se realiza ensayo.						
	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
DA	✗	✗	✓	✗	✗	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓

Fuente: Autor.

Para determinar la densidad aparente realizan el promedio de las partículas, inicialmente se humectan completamente y eliminan el aire contenido, luego pesan un picnómetro líquido calibrado que contenga el polvo, agregan el líquido de densidad conocida vuelven a pesar el picnómetro, (Cotes et al., 2013).

Otro método empleado es el de la Botella de Lechatelier según (Cotes et al., 2013), al volumen de contenido en una botella, añaden una cantidad exagerada de mineral pulverizado con el fin de humectar completamente, durante 3 horas, pasado ese tiempo se lee el volumen desplazado por el mineral a determinada temperatura.

Tabla 13. Ensayo Gravedad Específica.

ITEM	GRAVEDAD ESPECÍFICA		✓ Se realiza ensayo.		✗ No se realiza ensayo.	
	3	6	7	8	16	20
Gs	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Fuente: Autor.

La densidad aparente de los ladrillos de arcilla se encuentran normalmente entre 1,8 a 2,0 g / cm³ y es inversamente proporcional a la cantidad de ceniza de lodo agregada a la mezcla, como en (Lin & Weng, 1997), donde se observa una relación lineal entre la densidad aparente y la proporción de cenizas en la mezcla independientemente de las temperaturas, esto se debe a que el espécimen es poroso, por lo tanto, la absorción de agua es mayor y la densidad aparente se reduce, mientras que la relación de temperatura y densidad aparente es proporcional, en el artículo de (Mohamed et al., 2020) se obtienen menor densidad aparente y por ende menor peso.

El procedimiento para determinar la gravedad específica y densidad aparente lo realizan bajo la norma ASTM C373-82, análoga a las normas ASTM D6913-04





(2009), ASTM D7928- 16 y ASTM D854-14 para Perú, en donde la muestra de suelo tamizada (N° 40, 0.42 mm) se somete al siguiente procedimiento:

1. Se toman 80 gr de materia prima (Cuti & Urbina, 2018).
2. Se pesa un matraz volumétrico (Simax) de 500 ml aforado con agua destilada.
3. Se registra la temperatura en la parte baja media y alta, después se desecha el agua (Cuti & Urbina, 2018).
4. La muestra de suelo se coloca en un vaso de precipitación con 100 ml de agua destilada y se agita por dos minutos a una velocidad de 500 rpm, con ayuda de un agitador de hélice (Cuti & Urbina, 2018).
5. La suspensión se coloca en el matraz volumétrico previamente pesado (Cuti & Urbina, 2018).
6. Se agrega agua destilada hasta 1/3 de su volumen (Cuti & Urbina, 2018).
7. Se colocó inclina el matraz a 60° y se retira el aire retenido en los poros de suspensión, mediante una manguera durante intervalos de 15 segundos, por 10 minutos aprox., este proceso se realiza 3 veces, en la primera aumentando el volumen de agua en un tercio hasta llegar a la marca de aforo (Cuti & Urbina, 2018).
8. Una vez succionado el aire, se pesa el matraz volumétrico con la suspensión de suelo, (Cuti & Urbina, 2018).

5.2.5 Contracción en crudo y en quema (ASTM C - 326).

Es el grado de contracción durante el proceso de secado y cocción de la unidad de mampostería, es decir, el cambio progresivo en los puntos críticos de quema y se rige bajo la ASTM C-326 para poder determinar las variaciones de las dimensiones de mampuesto (Espitia et al., 2003), el 53.84% de investigaciones relacionadas al presente estudio realizan este ensayo (Tabla 14).

En base a los procesos anteriormente mencionados, la contracción por cocción la determinan por medio de una relación proporcional con la pérdida de agua entre las partículas de arcilla y para obtener un ladrillo de buena calidad los autores definen una contracción inferior al 8% (Phonphuak et al., 2016).

Tabla 14. Contracción del anillo de Fuego.

ITEM	CONTRACCIÓN					✓ Se realiza ensayo. ✗ No se realiza ensayo.							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
CA	✗	✗	✗	✗	✓	✓	✗	✓	✓	✗	✓	✓	✓





ITEM	CONTRACCIÓN												✓ Se realiza ensayo.	✗ No se realiza ensayo.
	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	
CA	✗	✗	✗	✗	✓	✗	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓	

Fuente: Autor.

Durante la contracción de estado húmedo a seco la superficie del mampuesto continuamente se mantiene a la misma humedad y cuando el periodo de velocidad sea constante es el momento en que se produce la contracción de la pieza, dado que la película de agua se empieza a evaporar hasta secarse, esto se debe a que la arcilla cocida ocupa menor volumen que cuando está en estado seco (Espitia et al., 2003).

Por ende, a mayor cantidad de agua absorbida por la arcilla, mayor será la contracción; sin embargo, algunas investigaciones han encontrado que, si las arcillas se llevan a la misma plasticidad, la contracción en el secado será proporcional a la capacidad de intercambio catiónico, (Espitia et al., 2003).

En la actualidad existen materiales desengrasantes, que reducen la contracción y permiten mantener la forma y el tamaño, evitando que se formen grietas o se produzcan deformaciones (Espitia et al., 2003). El límite que recomiendan es $\leq 8\%$, en la investigación realizada por (Lin & Weng, 1997) da a conocer que el porcentaje de contracción disminuye a medida que aumenta la cantidad de ceniza, debido a que la arcilla se expande con el aumento de la temperatura y lo determinan midiendo las dimensiones de las muestras secadas al horno, utilizando un calibre Vernier con una precisión de 0,01 mm (Ukwatta & Mohajerani, 2017a).

5.2.6 Humedad – OMC

El contenido de humedad es un factor importante que afecta las propiedades del ladrillo dado que el porcentaje óptimo retiene la unión máxima de las partículas en la mezcla, esta prueba se determina bajo la compactación estándar de la AASHTO de 1982 (Lin & Weng, 1997) análoga a las normas INEN 690 y ASTM D 2216-10 implementadas en Perú para calcular la humedad y la diferencia de pesos de la muestra seca y original (Cuti & Urbina, 2018).

Tabla 15. Ensayo de Humedad Optima (OMC).

ITEM	HUMEDAD OPTIMA												
	✓ Se realiza ensayo.					✗ No se realiza ensayo.							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
OMC	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓





ITEM	HUMEDAD OPTIMA					✓ Se realiza ensayo.					✗ No se realiza ensayo.			
	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	
OMC	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	

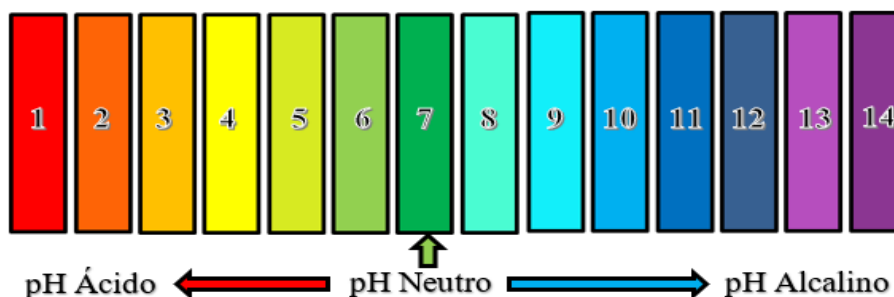
Fuente: Autor.

El OMC de una mezcla se basa en la humedad, es decir, que con el aumento de las proporciones de lodo en la mezcla aumenta el OMC (Weng et al., 2003) y es el método indirecto para calcular son los límites de Atterberg que determinan el intervalo de humedades en el que es moldeable la masa arcillosa (Cuti & Urbina, 2018), por otra parte, de investigaciones relacionadas al presente estudio el 92.307% realizan este ensayo (Tabla 15).

Otros métodos empleados para determinar la humedad son por desecación en estufa de laboratorio (Cuti & Urbina, 2018) en Brasil, mientras que en Uruguay utilizan una técnica de forma indirecta por medio del Radar Penetrante de Tierra o Geo-Radar (Cetrangolo, 2015).

5.2.7 Ph

Figura 13. Medidor de de acidez, neutralidad o alcalinidad.



Fuente: Autor, adaptado de internet.

De investigaciones relacionadas al presente estudio el 27.77% realizan este ensayo (Tabla 16).

Tabla 16. pH

ITEM	pH		✓ Se realiza ensayo.				✗ No se realiza ensayo.			
	1	4	5	9	5	16	21	8	25	26
pH	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Fuente: Autor





5.2.8 Porosidad Aparente

Para analizar el sistema de poros de la matriz cerámica, se estudia el comportamiento ante la presencia de agua por medio de diferentes técnicas como la prueba de porosimetría de inyección de mercurio (MIP), que consiste en cortar tres probetas de diferentes proporciones y temperatura en forma de cubo con 3 cm por cada lado, el porosímetro Micromeritics Autopore III modelo 9410 con una presión máxima de 414 MPa, para medir poros con un diámetro entre 0,003 y 360 μm (Cultrone et al., 2005) o mediante un microscopio electrónico de barrido (SEM) de transmisión de alta resolución como el JEOL SM 840 implementado en (Eliche-Quesada & Leite-Costa, 2016), donde las muestras se cubrieron sobre una rejilla de aluminio con carbón, mediante un dispositivo, de las investigaciones relacionadas al presente estudio el 19.23% realizan este ensayo (Tabla 17).

Tabla 17. Ensayo Porsidad Aparente.

ITEM	POROSIDAD	✓ Se realiza ensayo.		✗ No se realiza ensayo.	
	1	3	10	12	13
P	✓	✓	✓	✓	✓

Fuente: Autor.

Por otra parte, un aumento de la temperatura, aumenta la cantidad de poros grandes que son ocupados por aire, debido a que una pequeña inclusión de sales contribuye a que los ladrillos tengan detrimentos de los poros más pequeños (Cultrone et al., 2005) y por el contrario el incremento de la densidad, reduce la cantidad de poros grandes (Cotes et al., 2013), es decir, que los ladrillos porosos al incluir biosólido son aptos donde se requiera resistencia al calor, por las propiedades aislantes que atribuye la cantidad y tamaño de los poros después de incorporar lodo (Mohamed et al., 2020). La relación de los poros esféricos aislados presentes en la matriz cerámica, se genera por la hinchazón del material durante la fase vítrea del material, debido a que quedan retenidos gases por la baja viscosidad, (Ottosen et al., 2020).

➤ Porosidad abierta.

Es el porcentaje de volumen que representa la diferencia de peso entre la masa saturada y la masa seca con respecto al volumen exterior (Eliche-Quesada & Leite-Costa, 2016).

➤ Porosidad cerrada.

Es el porcentaje de volumen que representa la diferencia de peso entre la masa seca y la masa suspendida en agua con respecto al exterior (Eliche-Quesada & Leite-Costa, 2016).





5.2.9 Contenido de carbonatos.

El contenido de carbonatos es un factor importante dentro de las propiedades de las especímenes cocidos, debido a que condiciona el proceso de producción del material (Cotes et al., 2013), este análisis lo realizan mediante la calcimetría de Bernard (Pérez-Villarejo et al., 2012).

5.2.10 Absorción de agua

La absorción de agua es una medida del porcentaje de volumen vacío (porosidad abierta) (Cotes et al., 2013), que a su vez es un factor que afecta la durabilidad y resistencia al ambiente natural, por lo tanto la estructura interna del ladrillo debe ser intensiva para que el agua no se filtre (Lin & Weng, 1997), dado que valores altos de absorción de agua provocan cambios de volumen que resultarían en la aparición de grietas o fracturas (Ukwatta & Mohajerani, 2017b), de las investigaciones relacionadas al presente estudio el 92.30% realizan este ensayo (Tabla 18).

Tabla 18. Ensayo de Absorción de agua.

ITEM	ABSROCIÓN DE AGUA					✓ Se realiza ensayo. * No se realiza ensayo.							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
A	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

ITEM	ABSROCIÓN DE AGUA					✓ Se realiza ensayo. * No se realiza ensayo.							
	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
A	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Fuente: Autor

El ensayo se realiza bajo la norma colombiana NTC 4017, análoga a la norma UNE 67-027 (Cotes et al., 2013) y ASTM C67-60 (Lin & Weng, 1997), para el primer caso aplicado a Perú, se sumerge el ladrillo totalmente en agua durante un periodo prolongado (Cotes et al., 2013), mientras que para Colombia los especímenes para el ensayo deben estar compuestos por cinco (5) unidades libres de partículas sueltas, secos y fríos, para someterlos a inmersión durante 24 horas en agua limpia a 22°C, luego evalúan la saturación, secando el exceso de agua con un paño húmedo y finalmente determinan la masa (Manuel & Lozano, 2016).

En (Lin & Weng, 1997) basan su criterio en la CNS382-R2002, estableciendo una relación inferior al 15% para el ladrillo de primera clase y del 15 al 19% para el ladrillo de segunda, a su vez (Mohamed et al., 2020) da a coocer buenos resultados para inclusión del 35 % de lodo o biosólido.





Por otra parte, se debe monitorear dentro de los valores aceptables que estos no sean superiores al 17% para ladrillos de resistencia a la intemperie severa y menos del 22% para ladrillos de resistencia moderada a la intemperie información suministrada por (Ukwatta & Mohajerani, 2017b).

- Absorción de agua fría y caliente.

Se determinan según (Ukwatta & Mohajerani, 2017a) de acuerdo con AS / NZS 4456.14 midiendo la diferencia de peso entre las muestras asfixiadas y saturadas de agua fría durante 24 h y luego en agua caliente durante 5 h, para determinar la absorción de agua caliente se mide la diferencia de peso entre las muestras saturadas de agua caliente y asfixiadas.

5.2.11 IRA – Tasa Inicial de Absorción de agua

Las muestras de ladrillos las secan a 105 ° C de forma constante, luego las sumergen en agua destilada durante 24 hrs, las hierven durante 5 hrs, miden el peso de la muestra secada al horno y la masa de la muestra después de 60 segundos de absorción, de manera que estas queden sumergidas en agua durante un período de 1 min, manteniendo el nivel de agua desde la superficie de la cama del ladrillo en $3 \pm$ Nivel de 1 mm (Ukwatta et al., 2016).

5.2.12 Pérdida de Peso

La pérdida de peso se debe por la fusión de las sustancias inorgánicas durante la cocción, el valor normal es del 15 % después de la cocción a 800 °C para ladrillos de arcilla, mientras que para cenizas de lodo o biosólido al tener mayor contenido orgánico la disminución de la pérdida de peso es directamente proporcional con el contenido porcentual de lodo o biosólido, por ende, es mayor (Lin & Weng, 1997), mientras que la pérdida por calcinación se da a los 950 °C según informa (Cotes et al., 2013), de las investigaciones relacionadas al presente estudio el 65.38% realizan este ensayo (Tabla 19).

Tabla 19. Pérdida de Peso por Ignición.

ITEM	PÉRDIDA POR IGNICIÓN					✓ Se realiza ensayo.		✗ No se realiza ensayo.						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
LOI	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✗	✗	✓	✓	

ITEM	PÉRDIDA POR IGNICIÓN					✓ Se realiza ensayo.		✗ No se realiza ensayo.						
	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	
LOI	✗	✗	✗	✗	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	





Fuente: Autor

5.3 ANÁLISIS QUÍMICO

Para la caracterización de las materias primas llevan a cabo el método de Fluorescencia de rayos X, que induce una emisión fluorescente a causa de la excitación de los electrones internos de las órbitas internas de los elementos presentes (Mozo Moreno, 2014).

Con este método realizan un análisis cuantitativo de los materiales cerámicos expresados normalmente en óxidos (el dióxido de silicio, trióxido de aluminio, dióxido de titanio, trióxido de hierro u óxido férrico, óxido de calcio, óxido de magnesio, óxido de sodio y óxido de potasio), logran obtener el tipo y proporción de los elementos químicos presentes o ausentes en el comportamiento de la cocción del ladrillo estructural (Tabla 7), cabe mencionar que a temperaturas de 1000 °C se encuentran óxido volátiles tales como el dióxido u óxido de carbono y el óxido de azufre (Mozo Moreno, 2014).

5.3.1 Fluorecencia (XRF)

La composición química de las materias primas es otro factor importante para conocer el comportamiento de las materias primas, lo determinan mediante rayos X por el método de fluorescencia (XRF), como lo realiza (Ukwatta et al., 2016) y (Orellana, 2015), mediante un espectrómetro Bruker AXS S4 Pioneer, mientras que para determinar las propiedades cualitativa de las fases cristalinas de las materias primas, (Cotes et al., 2013) emplea el equipo Philips Magix Pro (PW-2440), (Juel et al., 2017) implementan el XRF-1800, SHIMADZU, a su vez (Fuente Molina et al., 2019) implementa en la prueba de espectroscopia dispersiva de energía la máquina OXFORD – EDS con sonda conectada a un microscopio electrónico de barrido JEOL Referencia 5910 JSM, de las investigaciones relacionadas al presente estudio el 75% realizan este ensayo (Tabla 20).

Tabla 20. Ensayo de Fluorecencia de Rayos X.

ITEM	FLUORECENCIA RAYOS X					✓ Se realiza ensayo.			✗ No se realiza ensayo.				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
XRF	✓	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✗	✗	✓

ITEM	FLUORECENCIA RAYOS X					✓ Se realiza ensayo.			✗ No se realiza ensayo.				
	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
XRF	✗	✓	✓	✗	✓	✓	✗	✓	✗	✓	✓	✓	✓

Fuente: Autor





La metodología empleada en (Cuti & Urbina, 2018) toman como referencia el manual GEO-QUANT M del equipo de Fluorescencia de Rayos X (S8 Tiguer), utilizan inicialmente un crisol cerámico, limpio y seco, luego se adiciona 20 g de muestra de la materia prima. El crisol con la muestra la introducen en una mufla (SNOL), a 950°C por 30 minutos y la dejan enfriar por 3 horas sobre un plato de evaporación cerámico, luego mezclan 6 gramos de muestra de suelo calcinada y 30 g de fundente (Li₂B₄O₇ al 99,5%) y la disponen en un perlador. Una vez fundida la sitúan en el equipo de Florescencia de Rayos X para su respectiva lectura, mientras que en (Juel et al., 2017) emperlan el ácido (HNO₃ : HCL) en 1:3 del volumen en proporción en la mezcla molida, durante 24 horas, para luego agregan 350-400 ml de agua destilada y hervir durante 2,5 horas para preparar una solución de 500 ml. Finalmente, la solución se filtró a través de un papel de filtro de 0,45 y se recolecta el tratamiento para determinar la concentración de metales pesados.

5.3.2 Microscopio electrónico de barrido (SEM)

El microscopio SEM muestra la microestructura de los especímenes, la permeabilidad y absorción del agua (Mohamed et al., 2020), mediante la utilización de electrones acelerados, enfocados en la superficie de la muestra, la resolución depende del microscopio electrónico, en el caso de (Cotes et al., 2013) está entre 0,01 y 10 µm utilizando un microscopio electrónico de barrido JEOL modelo JSM5800, con sistema de microanálisis OXFORD modelo ISIS 486, en (Ukwatta et al., 2016) el microscopio electrónico de barrido Philips XL30 y en (Mozo et al., 2015) mediante la técnica de espectroscopia de energía dispersiva (EDS) por medio de una sonda marca OXFORD acoplada a un microscopio electrónico de barrido (SEM) marca JEOL referencia 5910 JSM, de las investigaciones relacionadas al presente estudio el 42.30% realizan este ensayo (Tabla 21).

Tabla 21. Microscopía Electrónica.

ITEM	MICROSCOPIA ELÉCTRICA						✓ Se realiza ensayo. ✗ No se realiza ensayo.						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
SEM	✗	✗	✓	✗	✗	✓	✓	✗	✗	✗	✓	✗	✓

ITEM	MICROSCOPIA ELÉCTRICA						✓ Se realiza ensayo. ✗ No se realiza ensayo.						
	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
SEM	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓

Fuente: Autor

Para la toma de la muestra fijan un talón con un pasador de 25 mm de diámetro utilizan cinta de carbón para la pulverización catódica SPI (Ukwatta et al., 2016),





previa preparación de las muestras en lámina plana y posterior metalización (en oro de 20 nm), utilizan los electrones acelerados como fuente de radiación para obtener la imagen mediante barrido de un haz de electrones (Cotes et al., 2013), donde la existencia de micro agujeros en todas las muestras de ladrillos podría estar relacionada con el proceso de cristalización (Mohamed et al., 2020).

5.4 ANÁLISIS MINERALÓGICO (DRX).

Se desarrolla mediante la difracción de rayos X sobre cristales individuales o polvos, para establecer la presencia de fases cristalinas y obtener la composición de minerales, además de poder definir las características tecnológicas de la materia prima generan un análisis de la presencia de minerales arcillosos, ya que el comportamiento de la pasta influye en la elaboración de las unidades de mampostería, como en sus propiedades, estética y durabilidad (Mozo et al., 2015), de modo que la composición elemental de los cerámicos están ligados a las propiedades del material cerámico (Benlalla et al., 2015), de las investigaciones relacionadas al presente estudio el 76.92% realizan este ensayo (Tabla 22).

Tabla 22. Ensayo de Difracción de rayos X.

ITEM	DIFRACCIÓN RAYOS X					✓ Se realiza ensayo.		✗ No se realiza ensayo.						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
XRD	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✗	✓	✗	✓	✓	

ITEM	DIFRACCIÓN RAYOS X					✓ Se realiza ensayo.		✗ No se realiza ensayo.						
	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	
XRD	✗	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	

Fuente: Autor

En consecuencia, para determinar la composición mineralógica se implementan diferentes equipos entre ellos el difractómetro de Rayos X marca PANalytical con un detector PixCell, referencia X'Pert PRO MPD empleando la radiación de cobre (longitud de onda de 1,5406 Å) y la polarización del cerámico a un voltaje según (Mozo et al., 2015) de 45 kV, con corriente de 40 mA, el difractómetro X Siemens D5000 provisto de un monocromador de grafito, empleando la radiación de cobre K α (Pérez-Villarejo et al., 2012), el analizador elemental CHNS-O Thermo Finnigan Elementary Analyzer Flash EA 1112, empleando la combustión en atmósfera de oxígeno (Cotes et al., 2013) y el espectrofotómetro MagixPro PW- 2440 Philips equipado con un tubo de rodio, potencia máxima de 4 KW y con una sensibilidad de 200 ppm en la detección de elementos pesados metálicos (Fuentes Molina et al., 2017).





Por otra parte, el procedimiento para el barrido se realiza en el eje 2 con un ángulo entre 5° y 70°, con un paso de 0,013 ° con un tiempo por paso de 59 segundos como lo describe (Mozo et al., 2015), mientras que para (Cuti & Urbina, 2018) se emplean 50 gramos de muestra seca a $(110 \pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C})$ por 24 horas para ser introducida en el pulverizador electrónico BLEULE-MILL durante un minuto, en ambos procedimientos se emplea el difractómetro D8 ADVANCE, para su respectiva lectura.

5.5 ANÁLISIS TÉRMICO

Es utilizado para identificar los cambios físicos y/o químicos que pueden presentar las muestras en función de temperatura, por medio de diferentes ensayos y métodos:

5.5.1 Dilatométrico (ADT) o expansión térmica

Detecta el cambio de las dimensiones lineales de la muestra en función de la temperatura, para establecer el coeficiente de expansión térmica de la muestra, (Mozo et al., 2015). Emplean el equipo de Mettler Toledo 850e para el análisis termogravimétrico (ATG) y termo diferencial (ATD), utilizan entre 40 y 60 mg de muestra, para depositarlas en un crisol de platino y posteriormente ser calentadas a una velocidad de $10 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ desde temperatura ambiente hasta $1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$, según metodología empleada por (Cotes et al., 2013).

5.5.2 Gravimétrico (ATG).

Tabla 23. Análisis Térmico (TGA).

ITEM	ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO ✓ Se realiza ensayo. x No se realiza ensayo.					
	4	7	8	12	23	26
TGA	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Fuente: Autor

(Mozo et al., 2015) registra de manera continua la masa de una muestra colocada en la atmósfera en función de la temperatura, luego se generan aumentos de manera controlada hasta obtener un termo-grama o curva de descomposición térmica. Se realiza con el fin de monitorear la pérdida masiva de biosólidos o lodo a una temperatura elevada.

(Ukwatta & Mohajerani, 2017a) y (Ukwatta & Mohajerani, 2017b) analizan el comportamiento termométrico por medio de un Mettler Toledo 851, equipo bajo oxígeno (Pérez-Villarejo et al., 2012) y un termogravimétrico Pyris 1 TGA, de las investigaciones relacionadas al presente estudio el 16.67% realizan este ensayo (Tabla 23).





La metodología que emplean (Pérez-Villarejo et al., 2012) consiste en calentar en un crisol de platino de 20 a 25 mg a una velocidad de $10\text{ }^{\circ}\text{C} / \text{min}$ dentro del rango entre temperatura ambiente y $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, como en (Ukwatta & Mohajerani, 2017a) quienes realizan un proceso simultaneo con 10 mg de muestra, calentadas a una velocidad de $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ en un flujo de aire de 20 ml por minuto, desde $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta una temperatura máxima de $850\text{ }^{\circ}\text{C}$, mientras que en (Ukwatta & Mohajerani, 2017b) para monitorear el cambio de masa de las materias primas empleadas en los ladrillos (10mg) en los crisoles de platino, se someten a una tasa constante de calentamiento constante de $10\text{ }^{\circ}\text{C} / \text{min}$ en una atmósfera de aire con una velocidad de purga de $20\text{ mL} / \text{min.}$, desde $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta una temperatura máxima de $850\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Este comportamiento se puede realizar a su vez con base a la técnica de análisis térmico simultáneo (STA) en un equipo marca Netzsch referencia STA 409 CD, donde controlan la temperatura y el tiempo de los materiales desde una temperatura ambiente hasta $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, con velocidad constante es la tasa de calentamiento a razón de $10\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ (Mozo et al., 2015)

5.5.3 Análisis térmico diferencial.

Usado para medir cambios de energía del material, la muestra la analizan y el material inerte de referencia es sometido a un mismo programa de temperaturas, donde detectan las relaciones endotérmicas y exotérmicas que ocurren en el material arcilloso (Mozo et al., 2015).

5.5.4 Conductividad.

La conductividad térmica la determinan empleando el modelo de casa térmica denominado High insulation house de Phywe (Cotes et al., 2013) o con un analizador C-Therm TCi de sensor universal Mathis Instruments Ltd, aplicando calor constante de una fuente plana transitoria modificada, producida por un sensor de reflectancia de calor interfacial unilateral (Eliche-Quesada & Leite-Costa, 2016).

5.5.5 Velocidad de calentamiento.

Es otro factor que influye en la resistencia a la compresión, de modo que existe una relación directamente proporcional entre la temperatura y la resistencia del ladrillo por ende, en los ensayos se determinan valores de quema a los $1.5\text{ C}/\text{min}$ (Ukwatta & Mohajerani, 2017a), $6\text{ C}/\text{min}$ (Ottosen et al., 2020) , $7\text{ C}/\text{min}$ (Ukwatta et al., 2018), (Ukwatta & Mohajerani, 2017b) , (Lin & Weng, 1997), $2.5\text{ C}/\text{min}$ (Wolff et al., 2015), $5\text{ C}/\text{min}$ (Benlalla et al., 2015), con el fin de que en la incineración de los o biosólido la materia orgánica se descomponga y los minerales y metales pesados quede inmovilizando (Chang et al., 2020).





5.6 ANÁLISIS DE SUSTANCIAS PELIGROSAS

Las sustancias peligrosas en la unidad de mampostería con mayor inclusión de aditivo (lodo o biosólido) lo determinan mediante el ensayo de TCLP debido a que aporta mejores resultados técnicos, bajo los lineamientos establecido por la EPA (Environmental Protection Agency) en su método 1311, análoga a la UNE-EN 12457-4 aplicada en Perú esta norma es adecuada para determinar la movilidad tanto de compuestos orgánicos como inorgánicos presentes en líquidos, sólidos y residuos multifásicos, con el fin de determinar el beneficio logra cuando el elemento retiene o encapsula los metales pesados y demás sustancias contaminantes tanto orgánicas como inorgánicas (Ukwatta et al., 2016).

De las investigaciones relacionadas al presente estudio el 27.77% realizan el ensayo por TCLP (Tabla 24) y el 5.55% por Lixiviación en Botella (Tabla 25).

Tabla 24. Ensayo de TCLP

ITEM	LIXIVIACIÓN CARÁCTERÍSTICA DE TOXICIDAD									
	✓ Se realiza ensayo. * No se realiza ensayo.									
	4	5	7	9	11	15	16	18	21	23
TCLP	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Fuente: Autor

Las concentraciones en el filtrado de la lixiviación por TCLP, es medida con un espectrómetro de emisión atómica de plasma acoplado inductivamente ICP-AES Agilent 7500 metodología empleada por (Eliche-Quesada & Leite-Costa, 2016), mientras que en (Mohamed et al., 2020) las muestras son trituradas y tamizadas hasta obtener partículas menores a 9,5 mm, para obtener un líquido de extracción de TCLP midiendo el pH de la muestra de prueba, una vez extraído el líquido las muestras se colocan de forma segura en un dispositivo de agitación, a 30 rpm durante 18 horas y se conserva añadiendo ácido nítrico.

Tabla 25. Ensayo de Lixiviación en Botella.

ITEM	LIXIVIACIÓN EN BOTELLA		✓ Se realiza ensayo. * No se realiza ensayo.
	4	6	
ABLP	✓	✓	

Fuente: Autor

Por otra parte, en (Zhang et al., 2018) emplean otro método denominado tampón de ácido utilizando 35 gramos de peso del mampuesto, para ser remojado en botellas de polietileno selladas que contenían la solución de lixiviación, mientras que para el polvo de ladrillo (0.5 gr) se llena un vial de lixiviación con 10 ml de solución





de ácido acético y 0,5 g de polvo de ladrillo cocido, rotando un extremo a otro a 60 rpm durante los mismos períodos de agitación. Al finalizar cada período de agitación, los lixiviados los filtran a través de una membrana para determinar la concentración de metales pesados mediante el espectrofotómetro de absorción atómica de llama.

Actualmente, existe otro método de lixiviación análogo al TCLP denominado ABLP (Lixiviación en Botella), donde utilizan tamaños de partícula inferiores a 2,4 mm, luego de ser trituradas determinan el fluido midiendo el pH de la muestra de prueba para ser agitadas en el dispositivo a 30 rpm, durante 18 horas a temperatura ambiente entre $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ durante el período de extracción. Para la fase sólida filtran el extracto y lo analizan mediante el uso de espectrometría de masas de plasma acoplado inductivamente (ICP-MS), metodología adaptada de la Norma australiana de 1997.

5.6 ANÁLISIS DE VIABILIDAD AMBIENTAL.

La creación de ladrillos con biosólido y/o lodo con otros aditivos como complemento de los materiales, considera mecanismos en la predicción del comportamiento mecánico-físico del producto final (Bush Yonnathan, 2015) en relación a los datos del análisis químico y mineralógico de la materia (Bernal et al., 2003).

En la fabricación de una nueva y eficiente alternativa para la fabricación de ladrillos a partir de aditivos, los contaminantes que podrían emitirse durante el proceso de cocción son los que provienen de los aditivos a la mezcla en determinadas temperaturas como en (Quaranta, N., Caligaris, M., López, H., Unsen, M. y Lalla, 2009) a los 600°C se conocen emisiones de HC y CO representativas, por ende es importante el conocimiento que estas emisiones generan a la atmosfera.

La viabilidad ambiental se desarrolla en base al ciclo de vida (ACV) expuesto por la norma internacional ISO 14040, desarrollan las siguientes etapas:

- a) Determinan el objeto y alcance del proyecto es decir, el sistema, condiciones y campo de aplicación, (Mozo et al., 2015).
- b) Realizan el inventario del ciclo de vida, mediante flujo de entrada y salida para los diferentes procesos, mediante la elaboración de un modelo del ciclo de vida del producto, (Mozo et al., 2015).
- c) Determinan los impactos ambientales de tal manera que se evidencia los flujos descritos den el modelo enfocado al ambiente, (Mozo et al., 2015).
- d) Interpretan los impactos ambientales, (Mozo et al., 2015).

5.7 MARCO NORMATIVO





5.7.1 Marco Normativo aplicado en Colombia

En Colombia se implementa el decreto 1287 de 2014 del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, establecen discreciones para el uso del biosólido producto de la depuración de las plantas de tratamiento de agua residual, mediante la caracterización del biosólido en dos categorías, A y B a partir de dos criterios, el primero es de carácter químico enfocado en los metales y el segundo es el microbiológico, para lo cual se establecen los valores máximos permisibles (Anexo 1).

Mientras que para la elaboración de los ladrillos cerámicos se realizan los ensayos de laboratorios respectivo bajo la Norma Técnica Colombiana (NTC) teniendo en cuenta los siguientes factores:

5.7.1.1 Dimensiones Modulares – NTC 296

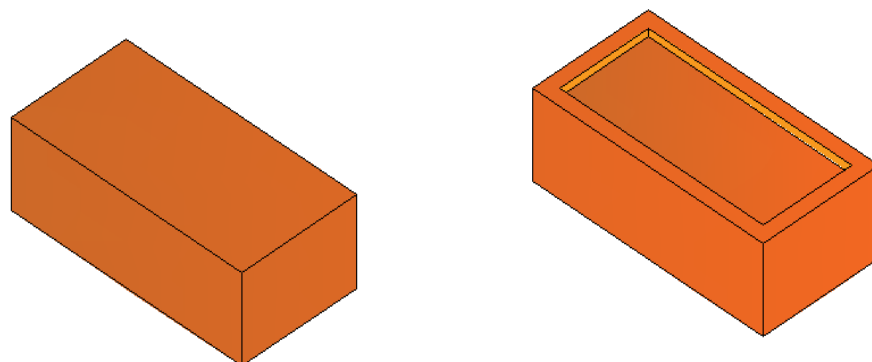
Tabla 26. Dimensiones Modulares

Dimensiones modulares (mm)			Dimensiones reales (mm)		
Longitud	Ancho	Altura	Longitud	Ancho	Altura
240	120	60	230	110	50
260	130	65	250	120	55
300	150	75	290	140	65
400	200	100	390	190	90

Fuente: Autor, adaptado de (Norma Técnica Colombiana 296, 2000).

5.7.1.1 Mampostería Estructural NTC 4205

Figura 14. Unidades de Mampostería



Fuente: Autor, elaborado en AutoCAD.





a) Absorción de agua

Tabla 27. Absorción Máxima de Agua.

Item	Inmersión en agua fría, 24 h, %		Ebullición 1 h, %	
	Promedio de 5 unidades	Individual	Promedio de 5 unidades	Individual
Mampostería Estructural, Fachada.	13	16	16	19

Item	Absorción en agua máxima - Interiores		
	Promedio de 5 unidades		Unidad
Mampostería Estructural.	No	17	20

Fuente: Autor, adoptado de la (Norma Técnica Colombiana 4205, 2009).

b) Resistencia mecánica a la compresión.

Tabla 28. Resistencia exigida por la NTC

Unidad	Tipo	Resistencia Mínima a la Compresión Mpa (kgf/cm ²)	
		Prom. 5 U	Unidad
Mampostería Estructural, Fachada	M	20 (200)	15 (150)
	PV – CLASE I	24 (240)	20 (200)
	PV – CLASE II	18 (180)	15 (150)
	PH	5 (50)	3.5 (35)
Mampostería No Estructural	M	14 (140)	10 (100)
	PV	14 (140)	10 (100)
	PH	3 (30)	2 (2)
	PH - LIVIANO	2 (20)	1.5 (15)

Nota: Para las unidades macizas los valores corresponden a la resistencia bruta mínima a la compresión, para unidades de 20 cm de altura y mayores, se aplica el 75% del requisito de resistencia a la compresión. **Fuente:** Autor, adoptado de (Norma Técnica Colombiana 4205, 2009).

c) Tasa Inicial de Absorción, TIA.

Es la capacidad de succión capilar medida durante 1min, de la superficie de cada una de las unidades estructurales secas, se expresa en g/cm²/min, el tiempo mínimo de humedecimiento se expresa en la siguiente tabla:





Tabla 29. Tasa inicial de absorción de agua en los mampuestos.

Tasa inicial de absorción g/cm ² /min	Tiempo recomendado de humedecimiento previo
< 0.10	Ninguno
< 0.15	0.5 a 1.0 min
< 0.25	3.0 a 5.0 min

Nota: Representa los tiempos mínimos de humedecimiento previo, para valores TIA mayores 0.25 g/cm²/min, las unidades de mampostería se deben pre - humedecer hasta reducir la tasa a menos de 0.10 g/cm²/min, a su vez cuando se pongan aditivos (agentes retenedores de agua) no es necesario pre – humedecer los ladrillos dado que es igualmente efectiva. **Fuente:** Autor, adoptado de la (Norma Técnica Colombiana 4205, 2009).

5.7.2 Marco Normativo aplicado en Otros países.

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos ha desarrollado un código para el uso o eliminación de lodos procedentes de aguas residuales en su sección 503, donde se reglamente el uso y disposición del biosólido mediante límites de contaminantes y patógenos (causantes de enfermedades, virus y bacterias), por lo cual se hace pertinente el conocimiento de la misma dado que la clasificación (Anexo 2) y límites permitidos aportan una idea del material a implementar (Anexo 3). Dentro de la revisión bibliográfica se encontraron las siguientes normas:

Tabla 30. Normativa encontrada en las 26 revisiones bibliográficas.

Porosidad	ASTMC20 (EEUU)
Composición Química	ASTM C114-09 (EEUU)
Unidades de Mampostería	AS / NZS 4456.1 (Australia)
Muestreo y prueba de ladrillos de arcilla estructural	ASTM C67
Gravedad Específica	AS 1289.3.5.1 (Australia)
Clasificación Suelos	AS 1289.3.6.1 (Australia)
Lixiviación en botella	AS 4439.3 (Australia)
Contenido Orgánico	método APHA (EEUU)
Eflorescencia	BDS 208 (2009) Bangladesh (Asia)
Lixiviación TCLP	USEPA 1311 (EEUU)
Poder Calorífica	UNE 32 006:1995 (España)
Prueba en ladrillos (contracción por cocción, pérdida de peso por ignición, absorción de agua, densidad aparente y resistencia a la compresión)	CNS1127-R3042 (China)
pH	NIEA-R208.00T (China)
Azul de Metileno	NF P 94-068 (Francia)
Contracción por secado y cocción	ASTM C326-03





Método de prueba estándar para la absorción de agua, la densidad aparente, la porosidad aparente y la gravedad específica	ASTMC373-88 (Britanica)
Flexión	ASTM C674-88
Prueba de Suelos	BS 1377-3 (Britanica)

Absorción de Agua	AS / NZS 4456.14 (Australia)	UNE 67-027(España)	UNE 67-031 (España)	CNS382-R2002 (China)
--------------------------	------------------------------	--------------------	---------------------	----------------------

Resistencia a la compresión	AS / NZS 4456.4 (Australia)	(ASTM C 67-02c, 2002).	UNE 67-026 (España)	CEDEX (España)
------------------------------------	-----------------------------	------------------------	---------------------	----------------

Límites de Atterberg	(ASTM D 4318, 2000)	NBR 6459 (Brasil)	NBR 7180 (Brasil)
Lixiviación TCLP	USEPA 1311 (EEUU)	UNE-EN 12457-4 (España)	TCVN 5945 (Vietnam)

Distribución Tamaño de partículas	AS 1289.3.6.3 (Australia)	NBR 7181 (Brasil)
Densidad	AS 1289.3.5.1 (Australia)	UNE-EN 772-13 (España)

Contenido Humedad	método APHA	(AASHTO T- 99, 1982)
--------------------------	-------------	-----------------------

Fuente: Autor.

Aashto (1982). Resistencia compresión 13.8 kpa, módulo de resiliencia para un esfuerzo desviador de 41.34 kpa y presión de confinamiento de 13.78 kpa, confinamiento de 34.5 kpa y una velocidad de aplicación de carga de 1%/min, contenido de agua 10-35%, compactación relativa 80-100%.

Aashto t99. Índice de plasticidad 4-52%, edad del espécimen 2-188 días, confinamiento 13.8-41.4 kpa, esfuerzo desviador 11-102.8 kpa.

Astm c67-60 (1998). Revisión de la metodología de evaluación de la resistencia a la compresión de la mampostería de ladrillo de barro cocido, resistencia de la compresión mayor o igual a 35 Mpa.

As 1289.3.5.1, bs 1377-3. Los valores mínimos de resistencia a la compresión se encuentran entre 30 y 50 kgf/cm², absorción de agua debe ser máximo de 13.5 % para mampostería no estructural.

Norma brasileña nbr 1781. Resistencias entre 14 y 40 mpa.





Tabla 31. Norma en la investigación de cada autor.

AUTOR	NORMATIVA						
3	ASTM C114-09	ASTM C67					
4	EPA	AS / NZS 4456.1	AS 4439.3, 1997				
5	ASTM C204	AASHTO (1982)	ROC CNS1127-R3042 (CNS 1999a) p	ROC-EPA (1997)	NIEA-R208.00T (ROC-EPA 1997).	ASTM C67-60 (1998)	CNS382-R2002 (CNS 1999b)
6	COMO 1726, 1993)	BS 1377-3, 1990					
7	(NTC) 296	NTC 4017					
8	AS 1289.3.5.1	BS 1377-3	AS / NZS 4456.14	AS / NZS 4456.4			
9	AASHTO (1982)	CNS (1999)					
10	NTC-4205	NTC 296	a NTC 4017	AASHTO			
11	ACI	CHINENSE					
12	Norma Brasileira NBR - 1781	Norma NBR - 6459	Norma NBR - 7180				
13	TCVN 5945 - 2005	norma francesa Norme Française NF P 94 - 068	ASTM C373-88, 2006a; ASTM C674-88, 2006; ASTM C326-03, 2006				

AUTOR	NORMATIVA						
14	NTP E.070						
15	16395 de 2004	NTC-4017					
16	ASTM D6913-04 (2009), ASTM D7928-16 y ASTM D854-14,		NTE-INEN 297				
17	NTC-296						
18	4205 (NTC)	NTC 4017	USDA				
19	ASTM C330	Decreto 822 de 1998	Norma 503 EPA				
20	AS 1289.1.1 2001.	AS 1289.3.5.1 2006.	AS 1289.3.6.1 1995.	AS 1726 1993	AS 1289.5.1.1 2003.	AS / NZS 4456 2003	BS 1377-3 1990.
21	método APHA	(ASTM D 4318, 2000)	(AASHTO T- 99, 1982)	(ASTM C 67-02c, 2002).	BDS 208 (2009) Bangladesh	USEPA 1311	
22	AS 1289.3.6.1 1995	AS 1726 1993	AS / NZS 4456 2003	AWA 2012			
23	UNE-EN 772-13	UNE 67-027	UNE 32 006:1995	UNE 67-026	UNE-EN 12457-4	UNE 67-031	

Fuente: Autor.





6 CAPITULO 4: RESULTADOS DE INCORPORAR EL LODO O BIOSÓLIDO COMO MATERIA PRIMA PARA LA FABRICACIÓN DE LADRILLOS

La factibilidad del uso del biosólido y/o lodo se determina mediante el análisis de los resultados y la viabilidad ambiental que suministran las 26 investigaciones seleccionadas de la revisión bibliográfica.

6.1 Biosólido

Tabla 32. Resultados Físico - Mecánicos del Biosólido.

ITEM	RESULTADO PORCENTAJES OPTIMOS (BIOSÓLIDO)			
	B25% (4 ETP)	B25% (4 WTP)	B10% (8)	B15% (18)
RC (Mpa)	14	28	19,4	27
RC Norma (Mpa)	5	5	5	20
A %	9,8	9,4	7,55	28,8
IRA (%)	0,88	0,82	-	-
LOI (%)	-	-	30,5	17

ITEM	RESULTADO PORCENTAJES OPTIMOS (BIOSÓLIDO)			
	B25% (20)	B25% (22)	B20%(24)	B5% (26)
RC (Mpa)	25,9	17,4	31.54	23,8
RC Norma (Mpa)	3	3	20	20
A %	8,7	9,8	14,6	13,41
IRA (%)	0,26	0,36	0,11	0,2
LOI (%)	5,5	6,5	-	7,71

Fuente: Autor.

Los biosólido implementados en las investigaciones muestran un buen comportamiento mecánico, debido que al incluir el 25% de este residuo sólido, se alcanzan resistencias a la compresión de 28 Mpa y 31.54 Mpa con el 20% de inclusión, siendo valores son superiores a los rangos establecidos por la normativa aplicativa a cada país (Tabla 32). El valor de resistencia de la investigación (Mozo et al., 2019) es dada por el contenido de aluminosilicatos en virtud de que genera un material más compacto (Mozo Moreno, 2021).





Tabla 33. Resultados de la composición mineralógica del Biosólido.

COMPOSICIÓN MINERAL DEL BIOSÓLIDO								
MINERAL	FORMULA	4 ETP	4 WTP	8	18	20	24	26
Silicon Oxide (Cuarzo)	SiO ₂	40	57,14	75	71,3	73,33	11	71,3
Caolinita	Al ₂ (Si ₂ O ₅)(OH) ₄	10	14,28	-	9,9	26,66	-	9,9
Iron Oxide Hydroxide (Goetita)	FeO(OH)	10	-	-	-	-	-	-
Calcium Carbonate (Calcita)	Ca(CO ₃)	10	-	-	6,9	-	-	6,9
Aluminum Hydroxide (Gibbsita)	Al(OH) ₃	-	-	25	11,9	-	-	11,9
Hematita	Fe ₂ O ₃	-	28,57	-	-	-	8,7	-
Fosfato de calcio y magnesio	(Ca _{2.589} Mg _{0.411})(PO ₄) ₂	30	-	-	-	-	14,4	-
Aluminosilicatos de calcio y sodio	Ca ₈₅ Na ₁₄ Al _{1.83} Si _{2.16} O	-	-	-	-	-	33,33	-
Cristobalita	SiO ₂	-	-	-	-	-	23,33	-
Silicato de hierro	Fe ₂ (SiO ₄)	-	-	-	-	-	2,3	-

Fuente: Autor.

En cuanto a composición mineralógica se evidencia que el biosólido presenta en mayor proporción cantidades de cuarzo lo que se traduce en mejora en cuanto a las propiedades de resistencia (Tabla 33), así como la presencia de caolinita que favorece la sinterización del material (Mozo & Gomez, 2016), por lo tanto, el material se comporta como la arcilla, haciendo lo apto para la fabricación de mampuestos cerámicos (Lagos Pirajan & Ayala Navas, 2018).

Tabla 34. Propiedades Físicas del Biosólido.

PROPIEDADES FÍSICAS BIOSÓLIDO								
ITEM	4 ETP	4 WTP	8	18	20	22	24	26
Grava	0,4	13,4	94,8	-	-	-	-	-
Arena	87,5	76	92,9	65,06	79,3		-	65,06
Limo	11,6	9,6	7,1	18,94	18,7	15,7	-	18,94
Arcilla	0,5	1	5,2	15,99	2		-	15,99
Contenido Orgánico	2,5	6,5	36,21	-	9,5	2,6	-	-
Gravedad Específica	-	-	1,83	-	2,52		-	-





PROPIEDADES FÍSICAS BIOSÓLIDO								
ITEM	4 ETP	4 WTP	8	18	20	22	24	26
Densidad g/cm3	2,03	1,87	1,9273	-	-	2,024	-	1,60
LL (%)	-	-	131	-	46	58	32	42
LP (%)	-	-	66	-	21	25	20	26
IP (%)	-	-	65	-	25	33	12	16
pH	6,61	6,72	-	-	-	-	-	7,97
Contracción Lineal	-	-	-	-	10	16	-	2.76

Fuente: Autor.

La disminución en la pérdida de masa se genera por la quema de materia orgánica y por la pérdida total de calcita (Wolff et al., 2015), lo que afecta la variación dimensional pero no el alabeo, esto significa que a mayor porcentaje de inclusión de biosólido, la variación dimensional aumenta en largo, ancho y altura como se determina en (Huillcaya Mendoza & Vidal Chavez, 2018).

Por otra parte, los minerales como el cuarzo y la colinita, afectan la plasticidad de las materias primas como se aprecia en los resultados (Tabla 34) al tener un 73.33% de cuarzo y un 26.26 de caolinita el índice de plasticidad es de 25%, mientras que al tener un 71.3 % de cuarzo y un 9.9 de caolinita este se disminuye en un 9%.

Tabla 35. Composición química del Biosólido.

Propiedades Químicas (4)		Propiedades Químicas (18)		Propiedades Químicas (24)	
Elemento	Cantidad	Elemento	Cantidad	Elemento	Cantidad
Arsénico	<0,009	Potasio	0,92	Aluminio	3,6
Cadmio	<0,017	Monóxido de Carbono	46,02	Silice	6,4
Cromo	<0,004	Silicio	8,65	Hierro	1,4
Cobre	4,15 - 8,91	Aluminio	4,35	Potasio	1,1
Plata	<0,003	Oxígeno	31,4	Calcio	27,6
Plomo	<0,01	Calcio	2,81	Sodio	0,2
Molibdeno	<0,027 - 2,27	Hierro	6,33	Magnesio	1,9
Níquel	3,18-3,96				
Antimonio	<0,06 - 0,48				
Bario	<0,013 - 1,38				
Berilio	<0,072				
Selenio	<0,045				
Zinc	36,55 - 68,67				





Fuente: Autor.

En (Benlalla et al., 2015) al someter la materia prima a altas temperaturas conlleva a la creación y cristalización de fases sólidas por los contenidos de calcio, hierro, aluminio, potasio, silicato de aluminio, forsterita (Tabla 35).

6.2 Biosólido Seco

Tabla 36. Propiedades Físico - Mecánica del Biosólido Seco.

ITEM	RESULTADO PORCENTAJES OPTIMOS (BIOSÓLIDO SECO)		
	15% Bs (6)	10% Bs (7)	15% Bs (26)
RC (Mpa)	34	38	25,06
RC Norma (Mpa)	3	20	20
A %	9,4	16,5	20,34
IRA (%)	0,36	0,2	0,31
LOI (%)	5.65	-	12,08

Fuente: Autor.

El biosólido seco tiene un buen comportamiento mecánico ante fuerzas axiales dado que presenta resistencias a la compresión de 38 Mpa con inclusión del 10% y superiores, cumpliendo con los estándares normativos.

Sin embargo, se estima que el 15% de biosólido es el más apto dado que arroja resultados cercanos a como al incluir el 10%, valores que también son reflejados en la absorción de agua que presenta la materia prima y en la composición mineral del biosólido seco (Tabla 36).

Tabla 37. Composición Minerológica del Biosólido Seco.

COMPOSICIÓN MINERAL DEL BIOSÓLIDO SECO				
MINERAL	FORMULA	6	7	26
Silicon Oxide (Cuarzo)	SiO ₂	63,15	71,3	71,3
Caolinita	Al ₂ (Si ₂ O ₅)(OH) ₄	-	9,9	9,9
Iron Oxide Hydroxide (Goetita)	FeO(OH)	-	-	
Calcium Carbonate (Calcita)	Ca(CO ₃)	-	6,9	6,9





Aluminum Hydroxide (Gibbsite)	$\text{Al}(\text{OH})_3$	-	11,9	11,9
Hematite	Fe_2O_3	5,26	-	-
Fosfato de calcio y magnesio	$(\text{Ca}_{2.589}\text{Mg}_{0.411})(\text{PO}_4)_2$	-	-	-
Aluminosilicatos de calcio y sodio	$\text{Ca}_{85}\text{Na}_{14}\text{Al}_{1.83}\text{Si}_{2.16}\text{O}$	-	-	-
Tosudite	-	15,78	-	-
Cristobalita	SiO_2	-	-	-
Jacobsite	MnFe_2O_4	15,78	-	-
Silicato de hierro	$\text{Fe}_2 (\text{SiO}_4)$	-	-	-

Fuente: Autor.

En la composición mineralógica al presentarse la des hidroxilación minerales como la gibbsite y la caolinita (Tabla 37), provoca la disminución en la pérdida de masa por ignición, y se evidencia por los los puntos exotérmicos dados por la transformación de estos minerales y/o contaminantes poliméricos (Mozo et al., 2015), mientras que los picos endotérmicos en los termogramas son ocasionados por la eliminación de agua y los puntos de inflexión a cuando se da la formación de cuarzo.

Tabla 38. Propiedades Físicas del Biosólido Seco.

PROPIEDADES FÍSICAS BIOSÓLIDO SECO			
ITEM	6	7	26
Grava	0,35	-	-
Arena	87,55	28	65,06
Limo	11,64	32	18,94
Arcilla	0,46	40	15,99
Contenido Orgánico	7,1	-	-
Gravedad Específica	2,51	2,51	-
Densidad g/cm ³	1,64	1,6	1.58
LL (%)	53	40,2	42.4
LP (%)	27	23,1	25.65
IP (%)	26	17,1	16.75
pH	-	-	7,97
Contracción Lineal	14,2	-	2.66

Fuente: Autor.

En las propiedades físicas (Tabla 38) se indica que cuando se incluye un 10% de biosólido seco y este presenta materia orgánica se produce un aumento en la





densidad, además de que la presencia de óxido de silicio disminuye la contracción y la plasticidad de la materia prima.

Tabla 39. Composición Química del Lodo Seco.

Propiedades Químicas (6)		Propiedades Químicas (7)	
Elemento	Cantidad	Elemento	Cantidad
Cobre	0,0271	Cadmio	0,034
Bario	0,1422	Cromo	<0,012
Zinc	0,0743	Plata	0,144
		Plomo	<0,015
		Mercurio	<0,083
		Selenio	<0,03
		Potasio	0,92
		Silicio	8,65
		Aluminio	4,35
		Oxígeno	31,4
		Calcio	2,81
		Carbono	46,02
		Hierro	6,33

Fuente: Autor.

Por otra parte, dentro de la composición química (Tabla 39) evidenciamos la presencia de elementos como el silicio que aportan resistencia al mampuesto, hierro y aluminio que aportan plasticidad, así como materiales desengrasantes como el Bario.

6.3 Ceniza de Biosólido

Tabla 40. Resultados de Implementar Ceniza de Biosólido.

ITEM	RESULTADO PORCENTAJES OPTIMOS (CENIZA BIOSÓLIDO)			
	15% Bc (10)	10% Bc (17)	15% Bc (26)	10% Bc (25)
RC (Mpa)	28,5	29,8	23,2	40,66
RC Norma (Mpa)	20	20	20	20
A %	16,23	17,02	22,78	14,86
IRA (%)	0,64	0,53	0,35	0,084
LOI (%)	-	-	7,4	5,34

Fuente: Autor.





Se identifica que el resultado de resistencia a la compresión de 40.66 Mpa del mampuesto elaborado con ceniza de biosólido al 10% (Tabla 40), posee diferentes tipos de silicatos lo que genera una reducción en la energía utilizada en el proceso debido a que la temperatura de cocción se disminuye, a vez presenta contenidos de sílice en su estructura genera una interconexión de poros, por ende, se genera una facilidad de moldeado por la plasticidad que le aporta la ceniza de biosólido y mejor rigidez.

Se aprecia que la absorción de agua (Tabla 40) es directamente proporcional a la cantidad de ceniza agregada e indirectamente proporcional a temperatura del fuego, es decir que una disminución de la absorción de agua genera un aumento en la resistencia a la intemperie.

Por otra parte, la pérdida de peso generada en los ladrillos por ignición de debe a la acidez y a que en el proceso de quema de los lodos o biosólidos se elimina las materias orgánicas e inorgánicas presentes en la mezcla (Wolff et al., 2015), lo que resultarían aportando beneficios en cuanto a la reducción de peso de la estructura.

Tabla 41. Propiedades Físicas de la Ceniza de Biosólido.

PROPIEDADES FÍSICAS CENIZA BIOSÓLIDO				
ITEM	10	17	26	25
Grava	67,49	67,49	-	
Arena			65,06	65,06
Limo	16,94	16,94	18,94	18,94
Arcilla			15,99	15,99
Contenido Orgánico	-	3,23	46,02	46,02
Gravedad Específica	-	-	-	-
Densidad g/cm ³	2,39	2,39	1,71	1,8268
LL (%)	30	30	33,35	35,523
LP (%)	25	25	19,5	19,82
IP (%)	5	5	13,85	15,703
pH	-	-	7,97	7,97
Contracción Lineal	-	-	1,96	5,34

Fuente: Autor.

Los valores bajos que representan la contracción (Tabla 41), indican que la mezcla se encuentra aún en estado no plástico y que no se llegó a la vitrificación de los minerales en el proceso de cocción; en la investigación realizada por (Espitia et al., 2003) el límite plástico es menor cuando se adiciona mayor cantidad de biosólido o lodo seco que para la arcilla (Ukwatta & Mohajerani, 2017a).





Tabla 42. Composición Mineral de la Ceniza de Biosólido.

COMPOSICIÓN MINERAL CENIZA DE BIOSÓLIDO					
MINERAL	FORMULA	10	17	26	25
Silicon Oxide (Cuarzo)	SiO ₂	57,693	57	11	11
Caolinita	Al ₂ (Si ₂ O ₅)(OH) ₄	-	-	9,9	9,9
Iron Oxide Hydroxide (Goetita)	FeO(OH)	-	-		
Calcium Carbonate (Calcita)	Ca(CO ₃)	-	-	-	-
Aluminum Hydroxide (Gibbsita)	Al(OH) ₃	-	-	-	-
Hematita	Fe ₂ O ₃	6,909	-	8,7	8,7
Fosfato de calcio y magnesio	(Ca _{2.589} Mg _{0.411})(PO ₄) ₂	-	-	14,4	14,4
Aluminosilicatos de calcio y sodio	Ca ₈₅ Na ₁₄ Al _{1.83} Si _{2.16} O	-	-	33,3	33,3
Cristobalita	SiO ₂	-	-	23,3	23,3
Silicato de hierro	Fe ₂ (SiO ₄)	-	-	2,3	2,3
Óxido de Hierro	Fe ₂ O ₃	-	7	-	-
Alúmina	Al ₂ O ₃	-	12	-	-

Fuente: Autor.

En cuanto a la composición mineralógica (Tabla 42) al presentar mayores proporciones de sílice en los especímenes se inmoviliza la metalización debido a la fase cristalina y a la presencia de hierro (Tabla 43) que reduce la lixiviación así como aporta un color rojizo al mismo.

En (Ukwatta & Mohajerani, 2017b), al implementar un 25% de lodo o biosólido se inmoviliza un 50% de los metales pesados, en comparación con los ladrillos en verde debido principalmente a la inclusión de biosólido o lodo en los ladrillos cocidos a altas temperaturas.

Tabla 43. Composición Química de la Ceniza de Biosólido.

Propiedades Químicas (10)		Propiedades Químicas (26)		Propiedades Químicas (25)	
Elemento	Cantidad	Elemento	Cantidad	Elemento	Cantidad
Cromo	0,09	Aluminio	3,59	Aluminio	3,59
Cobre	0,022	Sílice	6,41	Sílice	6,41
Níquel	0,09	Hierro	1,38	Hierro	1,38
Bario	0,107	Potasio	1,12	Potasio	1,12
Itrio	0,05	Calcio	27,64	Calcio	27,64
Vanadio	0,024	Sodio	0,17	Sodio	0,17
Circonio	0,09	Magnesio	1,85	Magnesio	1,85

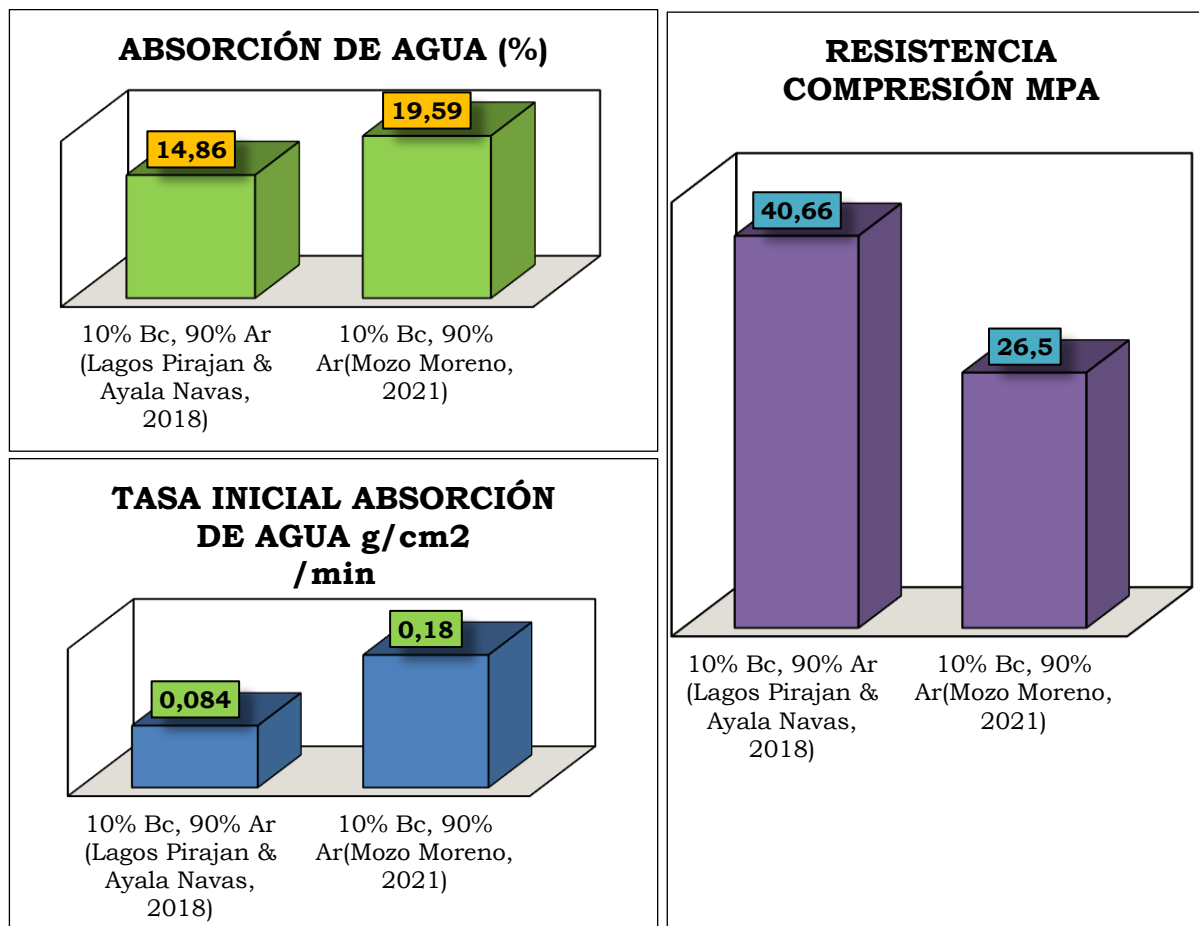
Fuente: Autor.





En (Lagos Pirajan & Ayala Navas, 2018) realizan una metodología similar (Mozo Moreno, 2021), estudian la inclusión de vidrio y cenizas de biosólido de la Ptar el Salitre ubicada en Bogotá DC, debido a que el material que mantiene sus concentraciones promedio de elementos potencialmente tóxicos por debajo de los límites permitidos por la norma en comparación, por lo tanto, en los resultados se evidencia que una disminución en la absorción de agua y por ende en la tasa inicial de agua, conlleva a obtener mejores condiciones de resistencia a la compresión, a su vez estas propiedades se mejoran a través de la inclusión del vidrio según los resultados de (Mozo Moreno, 2021).

Figura 15. Resultados de variables dependientes a 950°C



Fuente: Autor.

6.4 Lodo Seco





Tabla 44. Resultados de Implementar Lodo Seco.

ITEM	RESULTADO PORCENTAJES OPTIMOS (LODO SECO)								
	50% Ls (3)	10% Ls (9)	100% Ls (12)	30% Ls (13)	10% Ls (15)	5% Ls (16)	10% Ls (19)	10% Ls (21)	15% Ls (23)
RC (Mpa)	17,5	16,3	20	14,7	8,6	10,98	15	28	16
RC Norma (Mpa)	10,5	15	20	14,7	15	8	-	25	10
A %	11	15	45	16,2	16	11,21	24,79	9	27
IRA (%)	-	-	-	-	-	-	-	-	0,4
LOI (%)	-	13	7,5	11,2	-	-	-	9,7	15

Fuente: Autor.

Según (Ottosen et al., 2020) la porosidad del material según está dada por la relación del lodo con el aumento de arcilla, es decir, que cuando se implementa un 10% de lodo, la porosidad es menor en comparación del 30% a medida que se incrementa la temperatura a 950°C y 1000 °C respectivamente. Por otra parte, (Torres et al., 2012) recomiendan reducir la humedad del lodo antes de su incorporación en los ladrillos cerámicos porque el contenido de agua que este presenta puede afectar las condiciones de calidad (IRA, A, RC) al generarse un incremento en la plasticidad del mismo.

Tabla 45. Composición minel del Lodo Seco.

COMPOSICIÓN MINERAL LODO SECO						
MINERAL	FORMULA	3	12	13	16	23
Silicon Oxide (Cuarzo)	SiO ₂	42,85	15,625	42,85	4	-
Caolinita	Al ₂ (Si ₂ O ₅)(OH) ₄	-	-	-	7	-
Iron Oxide Hydroxide (Goetita)	FeO(OH)	-	37,5	-	-	-
Calcium Carbonate (Calcita)	Ca(CO ₃)	14,28	-	-	-	-
Hematita	Fe ₂ O ₃	-	3,125	-	-	-
Aluminosilicatos de calcio y sodio	Ca ₈₅ Na ₁₄ Al _{1.83} Si _{2.16} O	-	-	-	71	-
Cristobalita	SiO ₂	-	-	-	-	46,37
Óxido de Hierro	Fe ₂ O ₃	3,43	12,3	1,16	-	8,55
Albite		28,57	-	-	-	-
Monmorillonite		14,28	-	-	-	-
Anorthite		-	9,375	-	-	-
Diopside		-	-	57,14	-	-





COMPOSICIÓN MINERAL LODO SECO						
MINERAL	FORMULA	3	12	13	16	23
Muscovite		-	3,125		6	-
Alúmina	Al ₂ O ₃	16,5	30,1	62,66	-	20,33

Fuente: Autor.

La alta resistencia a la compresión (Tabla 44) se debe a los contenidos de calcio y magnesio, debido a que confieren buenas propiedades mecánicas al mampuesto, reportado por la investigación de (Wolff et al., 2015).

En un valor de pH más cercano al neutro (7.0) la lixiviación de metales es completamente baja porque la acidificación del material hace que el mismo sea más soluble al contacto con el agua.

El proceso de incineración u obtención de cenizas de lodo o biosólido resulta útil, dado que cuando la combustión es alta se genera una posibilidad muy reducida de que el material se filtre del mampuesto como indica (Lin & Weng, 1997), el lodo seco lixivia más cantidades de metal que las cenizas de lodo a causa de la oxidación de los metales por las altas temperaturas.

Tabla 46. Propiedades Físicas de la Ceniza de Lodo.

PROPIEDADES FÍSICAS CENIZA BIOSÓLIDO						
ITEM	3	9	12	13	16	21
Arena	78	-	-	-	50,1	37,7
Limo	20	-	-	-		62,3
Arcilla	0,2	-	-	-	49,9	
Contenido Orgánico	-	-	-	-	-	28,75
Gravedad Específica	2,33	-	-	-	-	
Densidad g/cm ³	1,625	1,6	-	-	2,55	
LL (%)	-	39	47	63,6	-	35
LP (%)	-	22	47	39,1	-	17
IP (%)	-	17	0	25	-	18
pH	-	7,19	-	-	-	7,5
Contracción Lineal	-	8	-	1,2	-	8,5

Fuente: Autor.

El incremento en la plasticidad de las pastas cerámicas les confiere mayor compactación (Tabla 46), resistencia mecánica y los hace más manejables en el proceso de conformado o moldeo de piezas cerámicas. Por lo tanto, cuando se aplica una cantidad bastante alta de ceniza en lugar de arcilla, el requerimiento de





agua es menor, mientras que el lodo sin ningún tratamiento tiene alta capacidad absorbente provocando un exceso de humedad, (Manuel & Lozano, 2016).

El límite plástico es inversamente proporcional a la cantidad de lodo o biosólido adicionado a la mezcla, debido a que disminuye la plasticidad de la mezcla y la capacidad de unión entre las partículas en el mampuesto, aumentando el tamaño de poros por la cantidad de agua que es absorbida.

Tabla 47. Composición Química del Lodo Seco.

Propiedades Químicas (9)		Propiedades Químicas (13)		Propiedades Químicas (15)	
Elemento	Cantidad	Elemento	Cantidad	Elemento	Cantidad
Cadmio	5	Cadmio	5	Arsénico	75
Cromo	1713	Cromo	31	Cadmio	85
Cobre	212	Cobre	17	Cobre	4300
Plomo	35	Plomo	36	Plomo	840
Níquel	1131	Níquel	15	Mercurio	57
Zinc	628	Zinc	35	Molibdeno	75
Carbono	24			Níquel	420
Hierro	18070			Selenio	100
				Zinc	7500
		Propiedades Químicas (19)			
		Elemento	Cantidad		
		Cromo	500		
		Cobre	75		
		Níquel	50 < 200		
		Zinc	160		
Propiedades Químicas (16)		Propiedades Químicas (23)		Propiedades Químicas (21)	
Elemento	Cantidad	Elemento	Cantidad	Elemento	Cantidad
Cobre	0,02	Arsénico	5,47	Arsénico	1,8 ± 0,3
Azufre	0,15	Cadmio	0,15	Cadmio	<0,01
Níquel	79,17	Cromo	314,3	Cromo	19,229 ± 6303
Potasio	1,89	Cobre	29,32	Cobre	385,7 ± 170
Zinc	0,03	Plata	2,4	Plomo	63,8 ± 5,6
Silicio	19,65	Plomo	0,66	Níquel	139,5 ± 1,91
Aluminio	6,32	Azufre	1,23	Zinc	250,6 ± 68
Calcio	6,44	Níquel	1,65		
Sodio	2,09	Selenio	4,71		
Manganeso	0,05	Zinc	15,92		
Magnesio	1,19	Carbono	22,18		
Titanio	0,35	Hidrógeno	3,18		
Estroncio	0,05	Nitrógeno	3,26		





Fósforo	0,17
Hierro	3,2

Fuente: Autor.

6.5 Ceniza de Lodo

Tabla 48. Resultados de Implementar Ceniza de Lodo.

ITEM	RESULTADO PORCENTAJES OPTIMOS (CENIZA LODO)	
	10% Lc (1)	20% Lc (5)
RC (Mpa)	-	26
RC Norma (Mpa)	-	15
A %	10,2	15
IRA (%)	-	-
LOI (%)	10	7,5

Fuente: Autor.

La pasta cerámica debe realizarse con la mayor finura posible a fin de obtener una mejor homogeneidad en el amasado mediante dosificaciones basadas en el máximo aprovechamiento en la elaboración de ladrillo y en el mejoramiento en propiedades como la resistencia a la compresión y absorción de agua (Afanador et al., 2013), asumiendo el proceso de mezclado a utilizar (artesanal o mecánico).

Tabla 49. Propiedades Físicas de la Ceniza de Lodo.

PROPIEDADES FÍSICAS CENIZA LODO	
ITEM	5
LL (%)	42,77
LP (%)	26,53
IP (%)	16,24
pH	-
Contracción Lineal	8

Fuente: Autor.

La densidad de las partículas de los ladrillos es inversamente proporcional a la cantidad de lodo adicionado en la mezcla, es decir, que cuando la mezcla absorbe más agua los ladrillos tienen un mayor tamaño de poros por la densidad ligera que presenta el espécimen.

En cuanto a las propiedades físicas (Tabla 49) que presentan los resultados de las combinaciones de arcilla y biosólido, indican que entre mayor sea el porcentaje de biosólido menor es la plasticidad en la mezcla por la cantidad.





Tabla 50. Elementos Químicos Presentes en la Ceniza de Lodo.

Propiedades Químicas (1)	
Elemento	Cantidad
Cromo	$40 \pm 0,1$
Cobre	541 ± 14
Azufre	$6,1 \pm 0,1$
Potasio	$5,8 \pm 0,2$
Zinc	1986 ± 56

Propiedades Químicas (5)	
Elemento	Cantidad
Cadmio	4
Cromo	1,197
Cobre	5,01
Plomo	310
Níquel	774
Zinc	2,95
Monoxido de Carbono	31
Hierro	28,106

Fuente: Autor.





7. CONCLUSIONES

El biosólido es un material que al no lixiviar los metales pesados y por la vitrificación de los minerales, le aportan una alta resistencia a la compresión a las unidades de mampostería para ser implementadas como elemento estructural o no estructural dentro de una obra de construcción.

La baja infiltración de agua en los ladrillos contribuye a tener un mejor comportamiento ante los agentes del medio ambiente, debido al desgaste que se puede ocasionar si la invasión de agua es alta, por lo tanto, se deben realizar ladrillos con baja porosidad y absorción de agua, para obtener una mayor durabilidad y resistencia al ambiente natural de los ladrillos.

Se recomienda el uso de ceniza de biosólido porque reducen la temperatura de sinterización y los metales son lixiviados en menor proporción mejorando las propiedades correspondientes a la resistencia a la compresión por su contenido en hierro, sílice y calcio.

La finura de las partículas de la ceniza disminuye con el porcentaje de adición en la mezcla, causando una reducción en la contracción de secado y minimización de la plasticidad y se disminuye el nitrógeno al incinerar gran parte de la materia orgánica.

Los ladrillos de arcilla con inclusión de cenizas de lodo o biosólidos secados al horno suelen tener mayor resistencia que los ladrillos secados al sol, como mayor durabilidad por la reducción en la absorción de agua, sin embargo, se recomienda evitar valores muy bajos porque el agua de lluvia se absorbería rápidamente a través de las juntas de mortero.

En el proceso de secado influye el grado de humectación que presenta el ambiente natural, es decir, que, si llegan a generar cambios en las condiciones del espécimen a causa de que la humedad residual cambia, por lo tanto, el medio debe favorecer las condiciones del ladrillo.

El incremento de lodo o biosólido genera un aumento de absorción de agua y por ende de contenido de humedad óptimo, mientras que con el incremento de la temperatura de cocción disminuye el contenido de OMC, por ende, se afecta la resistencia a la intemperie.





La pérdida de peso refleja una mayor cantidad en la emisión de gases que se produce durante el proceso de cocción de los lodos o biosólidos que se agregan a la mezcla, el criterio de pérdida de peso para un ladrillo normal es del 15%, por ende, se debe cumplir con la viabilidad técnica, sin afectar la ambiental.

Se recomienda no usar el proceso de fabricación artesanal debido des varianza que presentan las técnicas de trituración, mezcla, compactación, secado y cocción, debido a que se producen unidades porosas durante cocción de los ladrillos, lo que conlleva a que el ladrillo contenga mayor porosidad, menor resistencia de los ladrillos.

La densidad de las partículas de los ladrillos es inversamente proporcional a la cantidad de lodo adicionado en la mezcla, es decir, que cuando la mezcla absorbe más agua los ladrillos tienen un mayor tamaño de poros por la densidad ligera que presenta el espécimen.

El límite plástico es inversamente proporcional a la cantidad de lodo o biosólido adicionado a la mezcla, debido a que disminuye la plasticidad de la mezcla y la capacidad de unión entre las partículas en el mampuesto, aumentando el tamaño de poros por la cantidad de agua que es absorbida.

La temperatura de cocción es otro parámetro importante que afecta el grado de contracción por lo tanto debe generarse un aumento o disminución de manera proporcional se recomienda una contracción por debajo del 8%.

La diferencia de resistencias en las investigaciones se debe a la composición física, química y mineralógica de los materiales en verde y los cocidos, el método empleado recomendado es el de Prensado, debido a que la extracción disminuye la resistencia del ladrillo como lo especifica (Cotes et al., 2013).

El uso de lodo o biosólido en cerámicas estructurales y no estructurales, es un aporte significativo desde el punto de vista tecnológico, económico y ambiental porque produce materiales con mayor resistencia mecánica y permite la reutilización de lodo o biosólido reduciendo los costos de exploración de arcilla y generando nuevas materias primas bajo productos de calidad.

La resistencia a la compresión de una muestra de ladrillos con un 10% de lodo seco y el 10% de lodo incinerado es óptimo debido a que podría alcanzar entre el 70% y





98% del valor de los ladrillos de arcilla convencionales (Chang et al., 2020a), mientras que para un ladrillo con inclusión del 50% según los resultados de (Ukwatta et al., 2016), genera una disminución del 40% de la resistencia a la compresión.

Se analizó un buen comportamiento en cuanto a la resistencia a compresión en el la inclusión de biosólido seco al 10% con resistencia a la compresión de 38 MPa y en el biosólido calcinado con 40.66 Mpa, cumpliendo con la normativa colombiana para este caso particular en cuanto a los parámetros de resistencia, absorción de agua y tasa inicial de absorción de agua.

En el proceso de obtención de lodos, se recomienda realizar el espesamiento del material debido a que según reporta la investigación de (Chang et al., 2020b) se reduce hasta el 95% de la humedad y por medio de la deshidratación del mismo se genera una disminución en el volumen del mampuesto.

Se recomienda implementar ceniza de biosólido dado que al calcar el mismo se elimina el nitrógeno por la quema de la materia orgánica debido a que el alto contenido de este elemento químico al ser lixiviado por el lodo y/o biosólido contamina el agua subterránea y los suelos.

El empleo de lodos o biosólidos procedentes del tratamiento de aguas residuales para la fabricación de ladrillos cerámicos influye en las propiedades físicas y mecánicas produciendo ventajas como baja densidad, ladrillos aligerados, buena resistencia e incluso reducción del consumo de energía durante el proceso de cocción.

El aumento de la está reduce la conexión entre los poros, por consiguiente, aumenta la unión entre las partículas del ladrillo generando una mayor durabilidad y desarrollo de la resistencia del mampuesto, se recomienda una temperatura óptima de 800 a 1050 °C en virtud de que la estructura de ladrillo es estable y a mayor temperatura se puede generar agrietamiento como a menor se puede ver afectada la resistencia del mampuesto.

La durabilidad del ladrillo es determinada por la infiltración del agua (absorción de agua) y la tasa inicial de absorción de agua (IRA) debido a que en una temporada lluviosa el ladrillo al absorber más cantidad de líquido trae consigo la separación de las partículas de la mezcla (agrietamientos) y la disminución de resistencia al medio ambiente.

Se recomienda controlar la presencia de minerales en las materias primas debido al aumento que se genera en la plasticidad de la pasta y las pérdidas en el volumen causando deformaciones en los especímenes, por lo tanto, el incremento porcentual de lodo o biosólido produce aumento de la contracción





Se recomienda un porcentaje de adición entre el 5 y 25% ya que en valores mayores al 40 % , la adherencia en la mezcla se hace pobre por la cantidad de humedad que porta el lodo o biosólido, por lo tanto, la textura superficial del ladrillo se vuelve irregular (Manuel & Lozano, 2016).

En el ciclo de vida al incorporar 25% de biosólido, la investigación de (Ukwatta et al., 2018) reportó una disminución en las emisiones de CO₂ hasta en un 40% en comparación con las generadas durante el proceso de combustión del ladrillo sin biosólido, no obstante, el agotamiento de ozono y acidificación puede incrementar a medida que la masa del ladrillo disminuye, mientras que el impacto de toxicidad se reduce hasta en un 50% , lo que resulta viable para las condiciones ambientales.

El incremento en la plasticidad de las pastas cerámicas les confiere mayor compactación, resistencia mecánica y los hace más manejables en el proceso de conformado o moldeo de piezas cerámicas. Por lo tanto, cuando se aplican mayores proporciones de ceniza en lugar de arcilla, el requerimiento de agua es menor, mientras que el lodo sin ningún tratamiento tiene alta capacidad absorbente provocando un exceso de humedad, (Manuel & Lozano, 2016).

La calidad del material no depende los requisitos de absorción de agua, pero se deben cumplir con lo estipulado en la normativa (0.25g/cm²/min) a causa de la afectación que puede tener sobre el fraguado del mortero, generando la pérdida de la resistencia siendo el factor determinante para rechazar el ladrillo, este comportamiento que ligado según (Mozo et al., 2015) a la vitrificación del material y el sellado de los poros.





BIBLIOGRAFÍA

- Afanador García, N., Guerrero Gómez, G., & Monroy Sepúlveda, R. (2021). *MECHANICAL & PHYSICAL PROPERTIES OF SOLID , MASONRY CERAMIC BRICKS*. 1–10.
- Afanador, N., Ibarra, A., & López, C. (2013). Caracterización de arcillas empleadas en pasta cerámica para la elaboración de ladrillos en la zona de Ocaña , Norte de Santander. *Epsilon*, 20(ISSN 1692-1259), 101–119. <http://oaji.net/articles/2015/2065-1432479456.pdf>
- Aguilar Gutierrez, J. P. (2019). *ELABORACIÓN DE LADRILLOS MEDIANTE LA INCLUSIÓN DE CENIZA DE CARBÓN PROVENIENTE DE LA LADRILLERA BELLA VISTA DE TUNJABOYACÁ*. 5–10.
- Andreola, F., Barbieri, L., Lancellotti, I., Leonelli, C., & Manfredini, T. (2016). Recycling of industrial wastes in ceramic manufacturing: State of art and glass case studies. *Ceramics International*, 42(12), 13333–13338. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.05.205>
- Araujo, L., Molina, S., & Noguera, L. (n.d.). *aguas residuales como materia prima en la industria de la construcción : revisión bibliográfica*.
- Ayesta, G., García, M. P., Blanco, F., & Ayala, J. (1999). Bare face red-brown bricks manufactured with fly ash from the Narcea (Asturias) Coal Power Plant. *Materiales de Construcción*, 1999(256), 15–28. <https://doi.org/10.3989/mc.1999.v49.i256.432>
- Benito Ávila, C. L. (2020). *SÍNTESIS BIOSÓLIDOS EN COLOMBIA: DEFINICIÓN, VENTAJAS, USOS Y APLICACIONES EN LA INGENIERÍA A TRAVÉS DE UNA REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA*.
- Benlalla, A., Elmoussaouiti, M., Dahhou, M., & Assafi, M. (2015). Utilization of water treatment plant sludge in structural ceramics bricks. *Applied Clay Science*, 118, 171–177. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.09.012>
- Bernal, I., Cabezas, H., Espitia, C., Mojica, J., & Quintero, J. (2003). Análisis próximo de arcillas para cerámica. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.*, XXVII(105), 569–578.
- Betancourt, D., Díaz, Y., & Martirena, F. (2013). *proceso de fabricación de los ladrillos de cerámica roja : etapas de secado y cocción Influence of the addition of 2 % calcium carbonate during the manufacturing process of red ceramic brick : drying and firing stage*. 28, 113–124.
- Bush Yonnathan, M. C. (2015). *ELABORACIÓN DE LADRILLOS VIDRIADOS DE BAJO PESO Y ALTO DESEMPEÑO PARA USO ORNAMENTAL Y PARA LA INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN*“;. BUSH YONNATHAN MANUEL COAGUILA Para Optar el Título Profesional de. <http://bibliotecas.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/2915/MTmacobj042.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- 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://oemmndcbldboiebfnladdacbfmadadm/https://www.superservicios.gov.co/sites/default/archivos/Publicaciones/Publicaciones/2020/Ene/informe_sectorial_aa_2018-20-12-2019.pdf
- Cetrangolo, G. P. (2015). *Cuantificación del contenido de humedad en ladrillos utilizando radar penetrante de tierra*. September, 1–8.





- Chang, Z., Long, G., Zhou, J. L., & Ma, C. (2020). Valorization of sewage sludge in the fabrication of construction and building materials: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 154(June 2019), 104606. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104606>
- Cotes, M. T., Martínez, C., Iglesias, F. J., & Corpas, F. A. (2013). Estudio de la influencia del método de moldeo de materiales cerámicos elaborados a partir de residuos en sus propiedades. 52, 169–176. <https://doi.org/10.3989/cyv.222013>
- Cultrone, G., Sebastián, E., & De La Torre, M. J. (2005). Mineralogical and physical behaviour of solid bricks with additives. *Construction and Building Materials*, 19(1), 39–48. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.04.035>
- Cuti, S., & Urbina, A. (2018). Análisis de la revalorización de biosólidos de la PTAR, el Peral, Ambato, para insumo de mampostería. 155. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19582>
- Departamento, D. M., Brayan, A., Barrios, T., Yonatan, S., & Castro, C. (2018). Elaboración De Bloques De Mampostería Mediante El Uso De Mortero, Adicionado Con Ceniza Del Cuesco Y De Fibra De Palma Africana En El.
- Ditterich Baron, E. F., & Duque Velasquez, K. (2020). COMPORTAMIENTO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA POR VÍA SECA CON CENIZAS DE BIOSÓLIDOS GENERADOS POR LA PTAR DE ACACIAS, META.
- Dondi, M., Guarini, G., Raimondo, M., & Zanelli, C. (2009). Recycling PC and TV waste glass in clay bricks and roof tiles. *Waste Management*, 29(6), 1945–1951. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.12.003>
- Eliche-Quesada, D., & Leite-Costa, J. (2016). Use of bottom ash from olive pomace combustion in the production of eco-friendly fired clay bricks. *Waste Management*, 48, 323–333. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.11.042>
- Erazo Lynch, A. N. (2007). OPCIONES DE USO Y DISPOSICIÓN DE BIOSÓLIDOS EN LA REGIÓN METROPOLITANA, Universidad de Chile.
- Espitia, C. J., Quintero, J., Rodriguez, A., Bernal, F. I., Romero, F., Mojica, J., Cabezas, H., Hernández, M., Pachón, M., Múnera, M. H., & Ramirez, J. (2003). CATÁLOGO DE PROPIEDADES FÍSICAS, QUÍMICAS Y MINERALÓGICAS DE LAS ARCILLAS PARA CERÁMICA ROJA EN LOS CENTROS URBANOS DE MEDELLÍN, IBAGUÉ Y SABANA DE BOGOTÁ.
- Frans, P., Enrique, R., Julia Santos, N. de C., Marcia Carla, R. de O., & J. (n.d.). Manual de sistemas de secado en la Industria del ladrillo. In □□□ □□□□□□□ □□□□□ □□□□□ □□□□□□□ □□ □□□□ □□□□□□ □□□□□□.
- Fuente Molina, N., Isenia León, S. A., & Ascencio Mendoza, J. G. (2019). Adición de lodos residuales en la elaboración de matrices de cerámicas. *Revista EIA*, 16(32), 13–25. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-12372019000200013&lang=es%0Ahttp://www.scielo.org.co/pdf/eia/v16n32/2463-0950-eia-16-32-13.pdf
- Fuentes Molina, N., Isenia León, S. A., & Ascencio Mendoza, J. G. (2017). Biosólidos de tratamiento de aguas residuales domésticas, como adiciones en la elaboración de ladrillos cerámicos. *Producción + Limpia*, 12(2), 92–102. <https://doi.org/10.22507/pml.v12n2a8>
- González Lozano, M. A., & Ponce Peña, P. (2012). Uso de vidrio de desecho en la fabricación de ladrillos de arcilla. *CIBA Revista Interamericana de Las Ciencias Biológicas y Agropecuarias* González, M. A. G., & Ponce, P. P. (2012). Uso de Vidrio de Desecho En La Fabricación de Ladrillos de Arcilla. *CIBA Revista Interamericana*





- de Las Ciencias Biológicas y Agropecuarias, 1, 1, 43–56.
file:///C:/Users/NOEMI/Downloads/Dialnet-
UsoDeVidrioDeDesechoEnLaFabricacionDeLadrillosDeAr-5063615 (1).pdf
- Gonzalez Ferreira, X. A. (n.d.). 2. xeración de lodos e alternativas de xestión. 19–38.
- González Lozano, M. A., & Ponce Peña, P. (2014). Uso de vidrio de desecho en la fabricación de ladrillos de arcilla / Use of waste glass in the manufacture of clay bricks. *CIBA Revista Iberoamericana de Las Ciencias Biológicas y Agropecuarias*, 1(2), 43. <https://doi.org/10.23913/ciba.v1i2.17>
- Huillcaya Mendoza, P., & Vidal Chavez, N. Y. (2018). INFLUENCIA DEL PORCENTAJE ÓPTIMO DE INCLUSIÓN DE BIOSÓLIDOS DE LA PTAR SAN JERÓNIMO CUS- CO EN LAS PROPIEDADES FÍSICO – MECÁNICAS DE LADRILLOS KING KONG DE 18 HUECOS Y PILAS DE AL- BAÑILERÍA SEGÚN LA NTP E.070. 11–15.
- Hurtado, A. M. (2015). Proceso de transformación de biosólidos de las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) con vermicompostaje y su aplicación en germinación, caso países europeos: España, Reino Unido, Francia, Portugal, Italia. 51. <https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>
- IGAC. (2017). INSTRUCTIVO ETAPA DE CAMPO PARA LEVANTAMIENTO DE SUELOS COPIA NO CONTROLADA TABLA DE CONTENIDO No. de pág.
- Juel, M. A. I., Mizan, A., & Ahmed, T. (2017). Sustainable use of tannery sludge in brick manufacturing in Bangladesh. *Waste Management*, 60, 259–269. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.12.041>
- Lagos Pirajan, A. R., & Ayala Navas, A. A. (2018). ELABORACIÓN DE LADRILLOS INCORPORANDO COMO MATERIA PRIMA VIDRIO RECICLADO Y CENIZAS DE BIOSÓLIDO DE LA PTAR EL SALITRE. 1–117.
- Lara Pérez, M. Y. (2016). CENIZAS DE BIOSÓLIDO DE PTAR COMO LLENANTE MINERAL EN LA ELABORACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS TIPO MDC-19. 1–79.
- Lin, D. F., & Weng, C. H. (1997). Use Of Sewage Sludge Ash. *Manager*.
- Manuel, S., & Lozano, M. (2016). Evaluación técnica , económica y ambiental de lodos provenientes de la PTAR de la compañía internacional de alimentos agropecuarios (Cialta S . A . S) como alternativa de aprovechamiento para producción de ladrillos cerámicos.
- Martines Lopez, E., & Lira Cortés, L. (2016). Evaluación de los factores de influencia en el modelo de Luikov durante el secado de ladrillo Evaluation of Influence Factors in Luikov Model During Drying of Red Brick. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 17(1), 35–44. <https://doi.org/10.1016/j.riit.2016.01.004>
- Ministerio de Vivienda Ciudad y Desarrollo. (2014). Decreto 1287 Del 10 de Julio De 2014. 10-Julio-2014, 1–15.
<http://wsp.presidencia.gov.co/Normativa/Decretos/2014/Documents/JULIO/10/DECR ETO 1287 DEL 10 DE JULIO DE 2014.pdf>
- Mohamed, A., Ahmed, M., Naguib, A., & Saad, I. (2020). Case Studies in Construction Materials Study on properties of clay brick incorporating sludge of water treatment plant and agriculture waste. *Case Studies in Construction Materials*, 13, e00397. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00397>
- Mozo Moreno, W. R. (2014). La Economía Circular En La Industria De La Construcción: Alternativa Para El Manejo Y Disposición De Lodo De Plantas De Tratamiento De Aguas Residuales. Caso De Estudio PTAR Tunja, Boyacá.
- Mozo Moreno, W. R. (2021). LA ECONOMÍA CIRCULAR EN LA INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN: ALTERNATIVA PARA EL MANEJO Y DISPOSICIÓN DE





BIOSÓLIDO DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES. CASO DE ESTUDIO PTAR EL SALITRE – BOGOTÁ D.C. 1–120.

- Mozo, W., Cortés, M., & Vera, E. (2019). *Investigation on fired clay bricks by replacing clay with recycled glass and sludge ash*. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1386/1/012026>
- 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>
- Mozo, W., Gomez, A., & Camargo, G. (2015). *Efecto de la adición de biosólido (seco) a una pasta cerámica sobre la resistencia mecánica de ladrillos*.
- Muñoz V., P., Morales O., M. P., Letelier G., V., & MENDÍVIL G., M. A. (2016). Fired clay bricks made by adding wastes: Assessment of the impact on physical, mechanical and thermal properties. *Construction and Building Materials*, 125, 241–252. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.024>
- Orellana, X. (2015). *Uso de los lodos, producto del tratamiento de aguas residuales, para la fabricación de ladrillos*. 84.
- Ottosen, L. M., Bertelsen, I. M. G., Jensen, P. E., & Kirkelund, G. M. (2020). Sewage sludge ash as resource for phosphorous and material for clay brick manufacturing. *Construction and Building Materials*, 249, 118684. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118684>
- Pacheco García, B. (2019). *Evaluación del proceso de biotransformación de biosólidos procedentes de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Tunja- Boyacá, mediante compostaje con adición de larvas de Escarabajos*. 137. <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/19344/2019brigidpacheco.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Pérez-Villarejo, L., Eliche-Quesada, D., Iglesias-Godino, F. J., Martínez-García, C., & Corpas-Iglesias, F. A. (2012). Recycling of ash from biomass incinerator in clay matrix to produce ceramic bricks. *Journal of Environmental Management*, 95(SUPPL.), S349–S354. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.10.022>
- Pérez Alarcón, C. C. (2016). *ELABORACIÓN DE ADOQUINES DE CONCRETO, EMPLEANDO CENIZAS DE BIOSÓLIDO COMO MATERIAL SUSTITUYENTE DE MATERIA PRIMA*. August.
- Phonphuak, N., Kanyakam, S., & Chindaprasirt, P. (2016). Utilization of waste glass to enhance physical-mechanical properties of fired clay brick. *Journal of Cleaner Production*, 112, 3057–3062. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.10.084>
- Pineda Buitrago, L. L. (2017). *DIAGNÓSTICO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL (PTAR)*. 12–21.
- Pitiye, U., Yuen, S. T. . S., Mohajerani, A., Setunge, S., & Eshtiaghi, N. (2014). Incorporation of Biosolids in Fired Clay Bricks. *7th International Congress on Environmental Geotechnics*, 541–548.
- Quaranta, N., Caligaris, M., López, H., Unsen, M. y Lalla, N. (2009). Inclusión de residuos industriales en la producción de materiales cerámicos. *Inclusión De Residuos Industriales En La Producción De Materiales Cerámicos*, 12.
- Rojas Pulido, L. (2015). *FABRICACIÓN Y EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE QUINCE LADRILLOS REFRACTARIOS ELABORADOS CON CENIZA VOLANTE PRODUCTO DE LA COMBUSTIÓN DEL CARBÓN EN LAS CALDERAS DE LA CENTRAL TERMOZIPIA A DIFERENTES TEMPERATURAS, DE ACUERDO A LA NORMA ASTM C 113*. X(3), 373–379.
- Ruben Enrique Garces Aguilar, W. N. G. A. (2017). Caracterización de las arcillas del





- Norte del Cauca, Colombia enclave para la optimización del proceso productivo de la industria ladrillera. *Journal de Ciencia e Ingeniería*, 9(1), 6.
- Ruíz Fernández, D. M. (2015). *Influencia De La Adición De Vidrio Triturado En La Resistencia a La Compresión Axial De Un Ladrillo De Arcilla Artesanal De Cajamarca*. 116.
- Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, S. (2020). *ESTUDIO SECTORIAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS DE ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO - 2019 SUPERINTENDENCIA*.
- Torres, P., Hernández, D., & Paredes, D. (2012). Uso productivo de lodos de plantas de tratamiento de agua potable en la fabricación de ladrillos cerámicos. *Revista Ingeniería de Construcción*, 27(3), 145–154. <https://doi.org/10.4067/s0718-50732012000300003>
- 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). Leachate analysis of green and fired-clay bricks incorporated with biosolids. *Waste Management*, 66, 134–144. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.04.041>
- Ukwatta, A., Mohajerani, A., Eshtiaghi, N., & Setunge, S. (2016). 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., Eshtiaghi, N., & Sujeeva, S. (n.d.). *Variation in physical and mechanical properties of fired-clay bricks incorporating ETP biosolids*.
- Ukwatta, A., Mohajerani, A., Setunge, S., & Eshtiaghi, N. (2015). Possible use of biosolids in fired-clay bricks. *Construction and Building Materials*, 91, 86–93. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.033>
- 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>
- USEPA. (1994). A plain English guide to the EPA Part 503 Biosolids Rule. *Epa-832/R-93/003, September*. <https://www.epa.gov/biosolids/plain-english-guide-epa-part-503-biosolids-rule>
- Vélez Zuluaga, J. A. (2007). Los biosólidos: ¿una solución o un problema? *Producción + Limpia*, 2, 57–71. https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=a9h&AN=31881936&lang=en&site=ehost-live%5Chttp://www.lasallista.edu.co/fxcul/media/pdf/RevistaLimpia/vol2n2/PL_V2N2_57-71_biosolidos.pdf
- Weng, C. H., Lin, D. F., & Chiang, P. C. (2003). Utilization of sludge as brick materials. *Advances in Environmental Research*, 7(3), 679–685. [https://doi.org/10.1016/S1093-0191\(02\)00037-0](https://doi.org/10.1016/S1093-0191(02)00037-0)
- Wolff, E., Schwabe, W. K., & Conceição, S. V. (2015). Utilization of water treatment plant sludge in structural ceramics. *Journal of Cleaner Production*, 96, 282–289. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.06.018>
- Zhang, M., Chen, C., Mao, L., & Wu, Q. (2018). Use of electroplating sludge in production of fired clay bricks: Characterization and environmental risk evaluation. *Construction and Building Materials*, 159, 27–36. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.130>





ANEXOS

Anexo 1. Valores máximos permisibles de categorización de biosólidos para su uso

CRITERIO	VARIABLE	UNIDAD DE MEDIDA	CATEGORÍA BIOSÓLIDO (VALORES MÁXIMOS PERMISIBLES)	
			A	B
Químicos Metales Concentraciones Máximas	Arsénico	mg / Kg de biosólido (base seca)	20	40
	Cadmio		8	40
	Cromo		1000	1750
	Cobre		1000	1500
	Plomo		10	20
	Mercurio		18	75
	Molibdeno		80	420
	Níquel		300	400
	Selenio		36	100
	Zinc		2000	2800
Microbiológicos	Coliformes Fecales	Unidades formadoras de colonias UFC / g de biosólido (base seca)	< 1.0 E (+3)	< 2.0 E (+6)
	Huevos de Helmitos Viables	Huevos de helmitos viables / 4 g de biosólido (base seca)	<1	<10
	Salmonella Sp	Unidades formadoras de colonias UFC / g en 25 g de biosólido (base seca)	Ausencia	< 1.0 E (+3)
	Virus Entéricos	Unidades formadoras de placas UFP / 4g de biosólido (base seca)	<1	-

Nota: Se representa los valores máximos para la categoría A y categoría B, para lo cual en los virus entéricos se presenta una variable que son los fagos somáticos. **Fuente:** Autor, adaptado de (Ministerio de Vivienda Ciudad y Desarrollo, 2014).

Anexo 2. Clase de biosólido según el límite de patógenos.

CLASE	PATÓGENOS Y CONTAMINANTES	LIMITE
A	Coliformes fecales (UFC por gramo de sólidos totales)	< 1.0 +03
	Salmonella Sp (NMP por 4 gramos de sólidos totales)	<3





	Virus Entéricos (PFU por 4 gramos de sólidos totales)	<1
	Huevos de Helminto (HHV por 4 gramos de sólidos totales)	<1
B	Coliformes fecales (UFC por gramo de sólidos totales)	<2.0+03

Nota: Se representa la clasificación del biosólido según los límites que se establecen para cada clase, sin embargo, la norma EPA, considera cuatro opciones en cuanto a la reducción de patógenos, contaminantes y vectores, calidad excepcional (EQ), concentración de contaminante (PC), tasa de carga acumulativa de contaminantes (CPLR) y tasa de carga contaminante anual (APLR). **Fuente:** Autor, adaptado de United States Environmental Protection Agency Section 503 (USEPA, 1994).

Anexo 3. Límite de Contaminantes.

Contaminante	Límite de concentración de todos los biosólidos aplicados a la tierra	Límite de concentración de contaminantes para biosólidos EQ y PC	Límite de carga acumulativa de contaminantes para los biosólidos de las CPLR	Límites anuales de la tasa de carga contaminante para biosólidos APLR
	(miligramo por kilogramo) (base en peso seco)	(miligramo por kilogramo) (base en peso seco)	(kilogramo por hectárea)	(kilogramo por hectárea por año)
Arsénico	75	41	41	2
Cadmio	85	39	39	1.9
Cromo	3000	1200	3000	150
Cobre	4300	1500	1500	75
Plomo	840	300	300	15
Mercurio	57	17	17	0.85
Molibdeno	75	-	-	-
Níquel	420	420	420	21
Selenio	100	36	100	5
Zinc	7500	2800	2800	140
Aplicado a	Todos los biosólidos que son aplicados al suelo	Biosólidos distribuidos a granel y en bolsas	Biosólidos distribuidos a granel	Biosólidos distribuidos en bolsas

Nota: Se representa las concentraciones máximas para los 10 metales pesados, si se sobrepasan los límites establecidos en la presente tabla, se dice que no es un suelo apto para suelo. **Fuente:** Autor, adaptado de United States Environmental Protection Agency Section 503 (USEPA, 1994).

Además de generar demanda a nivel mundial, producen cantidades deliberadas que llegan a la atmósfera (Abbas et al., 2017), en ese mismo orden de ideas, el factor





de emisión por cada mil ladrillos varia de 6.35 - 12.3 kg para monóxido de carbono (CO) y 0.52-0.59 Kg de dióxido de azufre (SO₂), con un consumo energético de 0.28 a 3.56 MJ/Kg, según el proceso de fabricación aplicada y la geometría del mampuesto (Muñoz V. et al., 2016).

