



# Biosólidos de tratamiento de aguas residuales domésticas, como adiciones en la elaboración de ladrillos cerámicos<sup>1</sup>

Natalia Fuentes Molina<sup>2</sup>, Samir Alfonso Isenia León<sup>3</sup>, José Gregorio Ascencio Mendoza<sup>4</sup>

***Biosolid treatment of domestic wastewater as additions in the manufacturing of ceramic bricks***

***Tratamento de biosólidos de águas residuais domésticas, como adição na elaboração de ladrões cerâmicos***

## RESUMEN

**Introducción.** Actualmente se viene estudiando el aprovechamiento de biosólidos como adiciones residuales en la elaboración de materiales cerámicos, para la construcción no estructural; dentro de estos se encuentra el reemplazo parcial de la arcilla utilizada en la producción de ladrillos, con importantes beneficios ambientales y económicos. **Objetivo.** Evaluar el comportamiento físico mecánico de mezclas biosólido arcilla en unidades experimentales para su uso como material de construcción no estructural. **Materiales y métodos.** Se realizó la caracterización de los biosólidos y arcillas, con los cuales se elaboraron 60 ladrillos cerámicos, para determinar los porcentajes de adición (5, 10, 15, 20 y 30 %) óptimas de las mezclas, en razón de identificar la mejor respuesta frente a las pruebas de resistencia a la compresión y absorción de agua (capilar, sumergida y ebullición); además se elaboraron 6 ladrillos patrón (100 % de arcilla). **Resultados.** Se evidencian resistencias promedio de 27,1 MPa, cumpliendo los límites mínimos establecidos en la NTC-4205 para mampostería estructural (20 MPa) y no estructural (14 MPa). **Conclusiones.** Los ladrillos cerámicos con porcentajes óptimos de adición de biosólidos son los del 5, 10 y 15 %, los cuales presentaron resistencias superiores a los ladrillos patrón en todas las pruebas realizadas, indicándose que, al adicionar biosólidos a la mezcla de arcilla para la elaboración de ladrillos cerámicos, se garantiza su viabilidad técnica, por cuanto cumplen con los estándares de calidad establecidos en la norma técnica colombiana.

**Palabras clave:** biosólidos, arcillas, material cerámico, resistencia y absorción.

- 1 Artículo desarrollado del proyecto de investigación: "Aprovechamiento de biosólidos producidos en sistemas de tratamiento de aguas residuales, como adición en la elaboración de ladrillos cerámicos" y Financiado por la Universidad de La Guajira
- 2 MSc. Ciencias Ambientales, miembro del grupo Ciencia + Ambiente, Universidad de La Guajira. Km 5 Vía Maicao – Riohacha-La Guajira, Colombia, E-mail: nnfuentes@uniguajira.edu.co ORCID: 0000-0001-6082-5651
- 3 Ing. Ambiental de la Universidad de La Guajira Km.5 Vía Maicao – Riohacha- La Guajira, Colombia. E-mail: samir@uniguajira.edu.co ORCID: 0000-0002-4086-0676
- 4 Ing. Ambiental de la Universidad de La Guajira Km.5 Vía Maicao – Riohacha-La Guajira, Colombia. E-mail: jascencio@uniguajira.edu.co ORCID: 0000-0001-6829-7881

Artículo recibido: 21/06/2017, Artículo aprobado: 25/09/2017

Autor para correspondencia: Natalia Fuentes Molina, email: nnfuentes@uniguajira.edu.co

## ABSTRACT

**Introduction.** Currently, the use of biosolids as residual additions in the production of ceramic materials for non-structural construction is being studied. One of these is the partial replacement of clay used in the production of bricks, which brings important environmental and economic benefits. **Objective.** The present research evaluated the physical-mechanical behavior of biosolids - clay mixtures in experimental units for use as nonstructural construction material. **Materials and methods.** A characterization of biosolids and clays was made and 60 ceramic bricks were developed to determine the optimal addition percentages of the mixtures (5, 10, 15, 20 and 30 %), in order to identify the best response to compression and water absorption tests

(capillary, submerged and boiling). 6 pattern bricks (100 % clay) were also developed. **Results.** The average resistances evidenced in the results were 27.1 MPa, meeting the minimum limits set in the NTC-4205 for structural (20 MPa) and nonstructural (14 MPa) masonry. **Conclusions.** The ceramic bricks with optimal percentage of biosolids are those with 5, 10 and 15 % additions, which presented greater resistance than the pattern bricks in all tests, indicating that the addition of biosolids to the clay mixture in the manufacturing of ceramic bricks guarantees technical feasibility, because they meet the quality standards established by the Colombian Technical Standards.

**Keywords:** biosolids, clay, ceramic, resistance, absorption.

## RESUMO

**Introdução.** Está atualmente a ser estudada a utilização de sidos biológicos como adições residuais na preparação de materiais cerâmicos para a construção não estrutural; dentro destes é a substituição parcial de argila utilizada na produção de tijolos, com os benefícios ambientais e económicas significativas. **Objetivo.** Este estudo avaliou o comportamento mecânico de misturas físicas unidades experimentais argila biosólido para utilização como material de construção não estrutural. **Materiais e métodos.** Na Caracterização de sidos biológicos e argilas foi realizada, com o qual 60 tijolos cerâmicos foram desenvolvidos para determinar as percentagens de adições (5, 10, 15, 20 e 30%), misturas ideais devido a identificar a melhor resposta testes de resistência à compressão e absorção de água (capilar, submerso e de ebulição);

6 também tijolo padrão (100 % de argila) foram preparados. **Resultados.** Mostrando resultados, médias de 27,1 MPa resistências, que satisfazem os limites mínimos estabelecidos na alvenaria NTC-4205 estrutural (20 MPa) e não estrutural (14 MPa). **Conclusões.** É digno de nota que os tijolos cerâmicos com ótimas percentagens sidos biológicos de adição são 5, 10 e 15 %, o que mostrou mais elevados padrões de tijolos resistências em todos os ensaios, indicando que a adição de sidos biológicos para a mistura de argila a produção de tijolos cerâmicos, viabilidade técnica é garantida, porque satisfazem os padrões de qualidade estabelecido no padrão técnico colombiano.

**Palavras chave:** sidos biológicos, argila, materiais de cerâmica, resistência e absorção.

## INTRODUCCIÓN

El manejo y disposición final adecuada de los biosólidos en el mundo, se ha convertido en un proceso complejo, debido a las implicaciones ambientales que se derivan de su composición química (90 % contenido de humedad, 0,5-12 % de material orgánico, nutrientes, trazas de elementos metálicos) y microbiológica

(Navarro *et al.* 2008; Vélez, 2007), donde se mencionan los impactos ambientales, ocasionados sobre los cuerpos de agua, suelos y riesgos a la salud de las comunidades aledañas.

La disposición de los biosólidos demanda un manejo cuidadoso por los riesgos ambientales que pueden representar, ante la posibilidad de contener sustancias

contaminantes provenientes de las aguas tratadas y las altas cantidades alcanzadas diariamente (Vélez, 2007), lo que exige mayor investigación en el tratamiento, eliminación y aprovechamiento de estos, con el fin de disminuir los riesgos ambientales de estos.

Cabe destacar que, a pesar de que en Colombia se producen en promedio cerca de 274 t / día de biosólidos aproximadamente (de los cuales 94 t corresponden a base seca), con un alto valor energético (2,000 y 4,000 kcal / kg biosólidos) del cual el 97 % es generada por tres plantas: el Salitre (Bogotá), Cañavalejo (Cali) y San Fernando (Medellín) (Bolívar et al. 2015; Mozo et al. 2015), no se cuenta con mecanismos de manejo y disposición adecuados, acordes con las necesidades ambientales, en la mayoría de los casos, que sean económicamente viables y seguras (García et al. 2013).

Si bien, existen investigaciones previas, para el aprovechamiento del biosólido, con diferentes fines como su aplicación en suelos con actividades agrícolas (Mantilla, 2015), aprovechamiento energético (Rojas y Mendoza, 2012), creación de carbón activado (Moreno et al. 2006) entre otros, también se encuentran investigaciones, donde este es empleado como material de construcción, en la fabricación del cemento (Lachemi et al. 2007), producción de concreto (Cerón et al. 2006), construcción de carreteras y edificaciones (Rojas y Mendoza, 2012; Shakir et al. 2013), producción de material cerámico (Gaete, 2014; García et al. 2013; Mozo et al. 2015), entre otras.

Diferentes investigaciones acreditan el uso de los biosólidos para la elaboración de material cerámico, demostrando su viabilidad (García et al. 2013; Mozo et al. 2015; Navarro et al. 2008); sin embargo, es necesario ampliar en los análisis de la fluorescencia de rayos X, composición mineralógica, contenido de material orgánico, contenido de humedad, tamaño de partícula de estos biosólidos que, en últimas, son los que determinan la calidad de los materiales obtenidos mediante el análisis químico, mecánico y físico.

La utilización de los biosólidos como material de construcción resulta ser una alternativa atractiva para resolver las problemáticas ambientales relacionadas con el manejo y disposición en los sistemas de tratamiento de aguas residuales (Abdrakhimov y Abdrakhimova, 2011, Navarro et al. 2008), debido a que la inertización o mineralización de estos biosólidos en matrices cerámicas, mediante incineración, permite obtener materiales aptos para

la construcción (ladrillos y bloques), mejorando en muchos casos, ciertas propiedades como la resistencia mecánica y térmica, porosidad, peso, contracción, impermeabilidad, congelamiento, eflorescencias, entre otras (Shakyr et al. 2013, Torres et al. 2012).

Sumado a lo anterior, se ha encontrado en diversas investigaciones, que los biosólidos de los sistemas de tratamiento de aguas residuales presentan concentraciones similares en los componentes típicos ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ , entre otros) de las arcillas, facilitando su compatibilidad para hacer mezclas con ellas (García et al. 2013; Mozo et al. 2015). Esta afinidad, sumada a la capacidad de intercambio iónico, parece ser el principal mecanismo que hace posible el encapsulamiento de este tipo de biosólidos en las arcillas, durante la etapa de cocción dentro del proceso de elaboración de material cerámico, por lo que puede ser considerado como un proceso de solidificación-estabilización (García et al. 2013).

En la presente investigación se propone el aprovechamiento de los biosólidos proveniente de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas, mediante la sustitución parcial de las arcillas, en la elaboración de material cerámico, acorde a la NTC 296; lo anterior implicó un análisis técnico y ambiental, para dar respuesta a las problemáticas mencionadas, según los criterios de calidad establecido en la NTC 4205 y NTC 4017

## MATERIALES Y MÉTODOS

*Recolección y caracterización de arcillas y biosólidos.* Se seleccionaron y recolectaron biosólidos de la planta de tratamiento El Salguero, ubicada en el costado sur de la cabecera municipal, a unos 9 kilómetros del casco urbano de la ciudad de Valledupar; está constituida actualmente por una zona de cribado y desarenado, lagunas anaerobias, lagunas facultativas y de maduración. A esta se le descarga el mayor porcentaje de caudal de aguas residuales del acueducto del municipio de Valledupar. Por su parte las arcillas fueron recolectadas del municipio de San Juan Del Cesar –La Guajira Colombia– al norte del municipio, en una zona de explotación y fabricación de ladrillos cerámicos de manera artesanal.

La caracterización de las arcillas y biosólidos se realizó mediante el análisis de la composición mineralógica, la cual se detectó a través de la técnica espectrofotométrica de fluorescencia de rayos X, realizando un análisis químico elemental, cualitativo

y cuantitativo, de los elementos comprendidos entre el flúor (F) y el uranio (U) de las muestras biosólido y arcilla, con el espectrofotómetro MagixPro PW-2440 Philips equipado con un tubo de rodio, con una potencia máxima de 4 KW, con una sensibilidad de 200 ppm en la detección de elementos pesados metálicos. Además, se realizaron los ensayos de densidad, contenido de humedad, contenido de materia orgánica, plasticidad y granulometría.

La mezcla destinada a la elaboración de los ladrillos fue tamizada, empleando arcillas con tamaño de partículas no mayores a 1,18 mm, debido a que las características de la distribución granulométrica de los materiales residuales condicionan las relaciones en forma diferente: arcillas-biosólidos seco y arcillas-biosólidos calcinados, formando zonas topo-químicas de mayor reactividad arcillosa en granos menores que en granos mayores, como fue evidenciado al momento del mezclado. La dosificación de los materiales en las mezclas mencionadas se realizó mediante relaciones de peso y su homogeneización, de forma manual.

*Elaboración de los ladrillos cerámicos con diferentes porcentajes en las adiciones.* Se elaboró un total de 60 ladrillos cerámicos con material residual para determinar los porcentajes óptimos de biosólidos-arcillas, en razón de determinar la mejor respuesta de las mezclas frente a las pruebas de resistencia a compresión y las absorción de agua, con diferentes porcentajes de residuos, establecidos mediante el análisis de diferentes investigaciones entre las que se encuentran Gracia *et al.* (2013), Hernández *et al.*, (2006) y Torres *et al.* (2012), para esta investigación se seleccionaron porcentajes del 5, 10, 15, 20 y 30 % de adición del biosólidos residuales.

Además, se elaboraron 6 ladrillos con 100 % de arcilla, siendo este el bloque patrón; es decir, los ladrillos con los que se compararon la resistencia y absorciones de los ladrillos elaborados con aditivo residual.

Las dosificaciones de los biosólidos en los porcentajes mencionados, para la elaboración de los ladrillos cerámicos con adición de los biosólidos, se realizó teniendo en cuenta las proporciones calculadas por ladrillo en peso, con el objetivo de conocer la mejor adición y porcentaje. Para esta investigación, los ladrillos patrón y los ladrillos con adición residual se diseñaron con las especificaciones de la NTC 296, donde se establecen las dimensiones modulares, holguras y tolerancias de las unidades de mampostería de arcilla cocida; para este caso fueron de 5 cm de ancho, 5 cm de alto, 10 cm de largo.

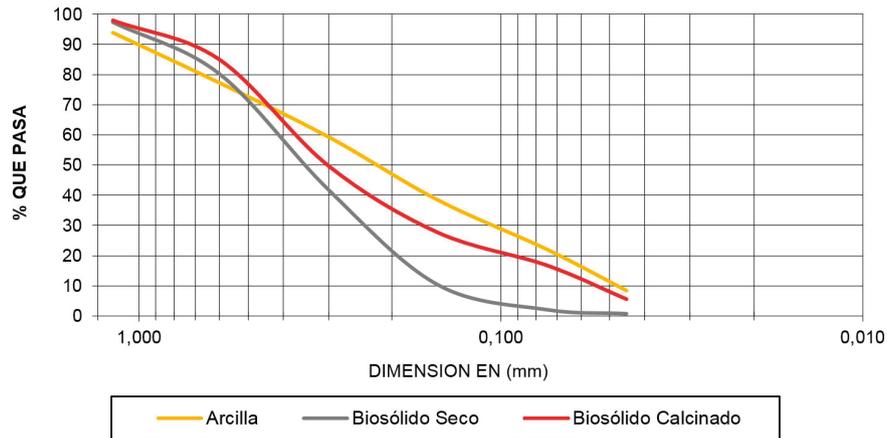
Se realizaron secado y cocción similar a lo trabajado por Mozo *et al.*, 2015. Los ladrillos fueron secados previa la cocción a una temperatura de 60 °C durante 24 horas; seguidamente se realizó el proceso de cocción a 700 °C con el fin de eliminar rastros de materia orgánica en los ladrillos; luego se aumentó la cocción a 900 °C en una mufla, para hacer los análisis correspondientes de resistencia a compresión y absorciones.

*Determinación de las propiedades físicas y mecánicas de los ladrillos cerámicos:* A los ladrillos elaborados se les realizaron ensayos de resistencia a la compresión y absorción de agua (capilar ABSC, sumergida ABSS y ebullición ABSE) para verificar el cumplimiento establecido en la NTC 4205 para la utilización de los ladrillos cerámicos para mampostería estructural y no estructural donde está fijada una resistencia mínima de 20 MPa y 14 MPa, respectivamente. Resistencia mecánica a la compresión: se ensayaron los ladrillos, teniendo en cuenta los procedimientos de muestreo y ensayo de los ladrillos cerámicos como establece la NTC 4017. Absorción de agua: se siguió el procedimiento descrito en la NTC 4017 para la absorción capilar (ABSC), absorción de sumergida (ABSS) y absorción de ebullición (ABSE).

## RESULTADOS

*Caracterización de arcillas y biosólidos.* El análisis granulométrico mostró una clasificación según AASHTO de A2 para todas las muestras, es decir, arenas limosas y arcillosas, y según USCS de SM para arcilla-biosólido calcinado y SW para biosólido seco, es decir SM: limos arenosos y SW, arena bien gradada. En cuanto a las medidas de plasticidad por el método de límites de Atterberg indicaron un límite líquido de 58 y 30 %, límite plástico de 29 y 25 % y un índice de plasticidad de 29 y 5 % para arcilla y biosólido calcinado, respectivamente (figura 1).

Es notable que los mayores porcentajes para las tres muestras se encuentran en diámetros menores a 0,425 mm (malla N.º 40), con porcentajes de 68,33; 61,16 y 67,49 % para la arcilla, biosólido seco y biosólido calcinado, respectivamente, siendo similares estos porcentajes para arcilla y biosólido calcinado. Los porcentajes menores a 0,075 mm (malla N.º 200), para las tres muestras fueron de 22,14; 2,19 y 16,94 % para la arcilla, biosólido seco y biosólido calcinado, respectivamente, siendo mayor el porcentaje de las arcillas; se presentan una tendencia homogénea en los tamaños de granos de las



**Figura 1. Curva Granulométrica de arcillas y biosólidos (seco y calcinado).**

Fuente: elaborada por los autores

arcillas como se evidencia en la figura 1. Con estos se puede asegurar que granulométricamente las arcillas están compuestas por materiales más finos, que los biosólidos; además, calcinar el biosólido reduce el tamaño de la partícula, debido a la volatilización del material orgánico.

El análisis de la composición química mediante fluorescencia de rayos X indica que las materias primas (arcilla, biosólidos seco y biosólidos calcinado) están mayoritariamente compuestas de óxido de silicio (59,19; 56,09 y 57,69 %), alúmina (19,20; 11,23 y 12,63 %), óxido de hierro (4,31; 6,35 y 9,91 %), y otros componentes minoritarios tales como minerales de óxido de calcio, óxido de potasio, óxido de sodio, y altos porcentajes de óxido de azufre tanto en los biosólidos secos como en los calcinados, presentados en la tabla 1.

Los altos niveles de óxido de azufre ( $\text{SO}_3$ ) presentes en los biosólidos seco (7,25 %) y calcinado (8,18 %), en comparación con las arcillas (0,14 %) evaluadas en la presente investigación, deja en evidencia, en la tabla 1, los posibles riesgos ambientales, que se pueden presentar con el uso de los ladrillos cerámicos elaborados con las adiciones, debido a que la incineración no es una solución ecológicamente atractiva y por sus efectos dispersivos no elimina los contaminantes que puedan estar presentes en los biosólidos, sino que puede redistribuirlos al aire (Bedoya et al., 2013).

Además, se encontraron en las arcilla, biosólidos secos y biosólidos calcinados, la presencia de metales pesados como zinc (0,010; 0,031 y 0,039 %), níquel (0,00; 0,008 y 0,009 %), cromo (0,000 %, 0,014 %, 0,09

**Tabla 1. Análisis de la composición química de arcillas y biosólidos.**

Elemento y / o compuesto	Arcilla % en peso	Biosólido seco % en peso	Biosólido Calcinado % en peso
$\text{SiO}_2$	59,196	56,089	57,693
$\text{Al}_2\text{O}_3$	19,200	11,228	12,636
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	4,310	6,348	6,909
$\text{K}_2\text{O}$	2,579	2,615	2,688
$\text{Na}_2\text{O}$	2,485	1,873	1,931
$\text{CaO}$	1,684	4,560	5,091
$\text{MgO}$	1,469	0,944	1,136
$\text{TiO}_2$	0,612	1,360	1,474
$\text{P}_2\text{O}_5$	0,242	1,402	1,776
$\text{MnO}$	0,193	0,089	0,117
Cl	0,153	0,033	0,029
$\text{SO}_3$	0,141	7,251	8,178
Ba	0,084	0,099	0,107
Ce	0,044	0	0
Zr	0,038	0,093	0,090
Sr	0,022	0,023	0,026
V	0,012	0,016	0,024
Rb	0,011	0,007	0,009
Zn	0,010	0,031	0,039
Cu	0,006	0,011	0,022
Y	0,005	0,004	0,005
Nb	0,002	0	0
Cr	0	0,014	0,009
Ni	0	0,008	0,009

Fuente: Elaborado por los autores

%) y cobre (0,006; 0,011 y 0,022 %) respectivamente, presentados en la tabla 1; estas últimas son las menores concentraciones de las materias primas. Cabe destacar que estos metales se encuentran siempre presentes, en bajas concentraciones, en las aguas residuales domésticas, pero existen en ocasiones concentraciones alarmantes de los biosólidos (Bedoya et al., 2013), buscando, mediante el proceso de cocción, encapsular los metales en el interior de los ladrillos cerámicos, con el fin de tratar de disminuir su peligrosidad con la interacción del medio ambiente.

De lo anterior se puede resaltar que los compuestos mayoritarios de las materias primas, se encuentran distribuidos en porcentajes similares en cada una de las muestras estudiadas, asemejándose la presencia

de compuestos entre estos lo que beneficia el aprovechamiento de los biosólidos por su afinidad con las arcillas, lo cual facilita la mezcla de los mismos en la elaboración de ladrillos cerámicos.

*Otros análisis de las arcillas y biosólidos:* en la tabla 2 se observa que el contenido de humedad en las arcillas (3,22 %) es similar al biosólido seco (3,41 %); sin embargo, el contenido de materia orgánica es diferente entre estos, siendo evidente la influencia que este puede tener en la elaboración de los ladrillos cerámicos, razón por la cual la presente investigación plantea calentar los biosólidos, como estrategia para reducir los contenidos de materia orgánica (3,23 %), de forma tal que se aproxime a las características de las arcillas (0,11 %).

**Tabla 2. Caracterización de materias primas**

CARACTERÍSTICAS	ARCILLA	SÓLIDO SECO	BIOSÓLIDO CALCINADO
Humedad (%)	3,22	3,41	0,66
Materia orgánica (%)	0,11	3,23	-----
Densidad (g/mL)	2,40	1,63	2,39
Índice de Plasticidad (%)	29	-----	5

Fuente: elaborado por los autores

Por su parte, las densidades se correlacionan con la granulometría, se evidencia que las densidades más altas se presentan en las arcillas (2,40 mg / L), seguidas por el biosólido calcinado (2,39 mg/L) y el biosólido seco (1,63 mg/L) como se muestra en la tabla 2; esto permite estimar el grado de compactación y la porosidad del mismo, donde se evidenció el incremento de esta última con la adición de biosólido, lo cual se puede atribuir a la densidad de las materias primas principalmente a las del biosólido seco, debido a las características de estos y a la heterogeneidad de las dos estructuras que integran las mezclas, como se evidencia en la caracterización química alterando las reactividades entre los materiales.

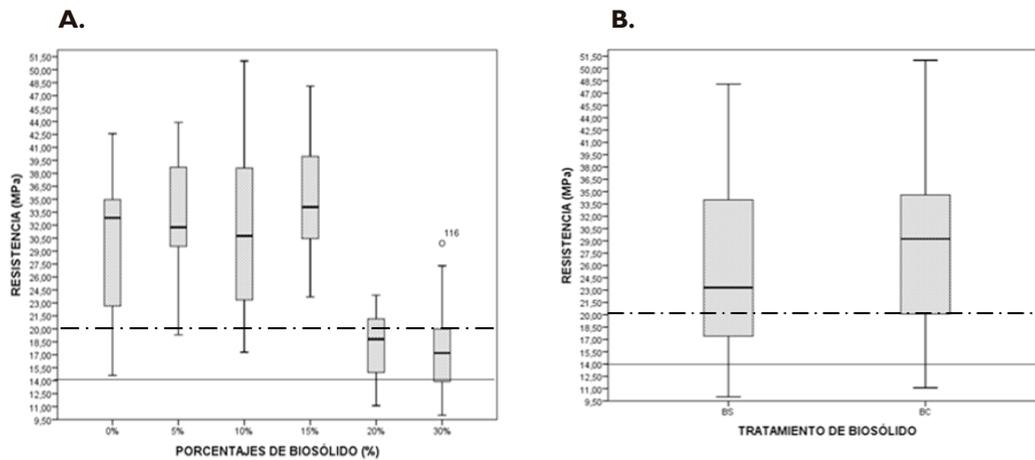
Los índices de plasticidad de las materias primas muestran mayor plasticidad en las arcillas (29 %), pudiendo clasificar estas como arcillas de alta plasticidad según USCS en función de los límites de Atterberg, y como A-7-6 según AASHTO, y el biosólido calcinado (5 %) como limos de baja plasticidad, según USCS y A-4 según AASHTO.

*Caracterización de ladrillos cerámicos con diferentes porcentajes en las adiciones.* El contenido de materia orgánica de los ladrillos mantiene una relación directamente proporcional con el porcentaje de adición, lo cual es debido al contenido de materia orgánica del biosólido seco, contrario a las relaciones de la densidad de los ladrillos y el porcentaje de adición que presentan una relación inversamente proporcional; esto posiblemente es debido a las diferencias de tamaño en las partículas del biosólido en comparación con las arcillas lo que, sumado al contenido de materia orgánica, puede generar un aumento en la porosidad de los ladrillos al incrementar las adiciones de biosólido.

En relación con el peso promedio de los ladrillos cerámicos, se presentaron mayores valores en los ladrillos patrón (365,83 g), seguidos por los ladrillos con adiciones de biosólido calcinado (360,32 g) y biosólido seco (358,47 g), lo cual puede ser debido a las diferencias granulométricas de los materiales que influyen en la compactación de las mezclas.

Lo anterior, se puede atribuir, al aumento en la porosidad de los ladrillos cerámicos (7,38; 7,40; 7,66; 7,83 y 8,14 %) a medida que incrementa el porcentaje

de adición 5, 10, 15, 20 y 30 % de las mezclas biosólido-arcilla, como se menciona en Freyburg y Schwarz (2007) y Navarro et al. (2008).



**Figura 2. Resistencia a la compresión (MPa  $\pm$  DE) de ladrillos cerámicos con biosólidos de aguas residuales. A. Tratamiento del biosólido (BS: biosólido seco y BC: biosólido calcinado) B. Porcentajes de biosólidos (0, 5, 10, 15 %, 20 y 30 %).**

Fuente: elaborada por los autores

*Determinación de las propiedades físicas y mecánicas de los ladrillos cerámicos. Análisis de resistencia a la compresión de los ladrillos cerámicos evidenciado en la figura 2.* Las relaciones de la resistencia a la compresión y el porcentaje de biosólidos adicionados registraron una diferencia significativa (K-W: 73,069;  $P < 0,000$ ; N: 120), en donde las mayores resistencias se presentaron con los porcentajes de adición del 5, 10 y 15 %, y las menores resistencias con porcentajes del 20 y 30 % de adición, cumpliendo los límites mínimos establecido en la norma NTC-4205 para mampostería no estructural hasta porcentajes de 15 %, presentado en la figura 2A.

Es preciso resaltar que el porcentaje de adición del 15 % presenta los valores máximos de resistencias, superando los valores de los ladrillos patrón (100 % arcilla); de esta manera se muestra que se obtienen óptimas resistencias con porcentajes de adición hasta un 15 %, caso contrario a los porcentajes de adición del 20 % y 30 % donde la resistencia tiende a disminuir, con una relación inversa. Lo anterior permite afirmar que es posible el aprovechamiento es estos hasta un 15 % de reemplazo de la arcilla.

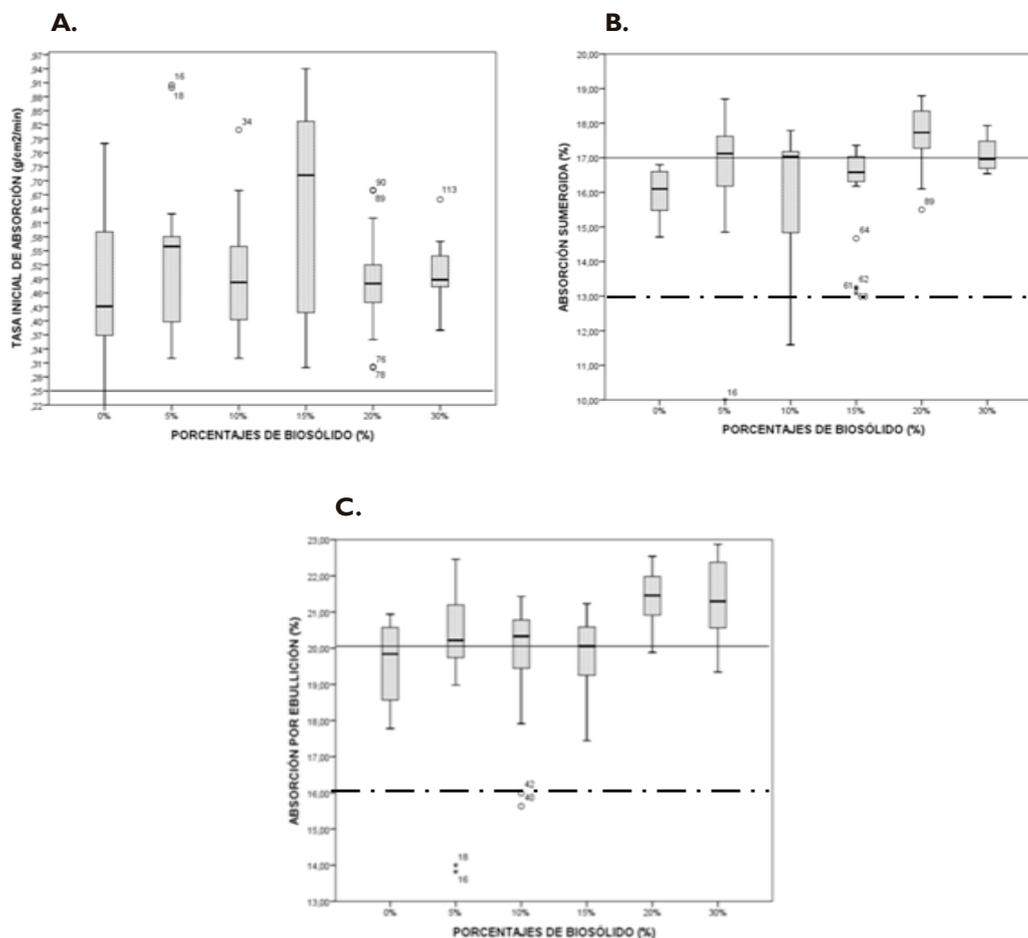
Los análisis de resistencia a la compresión y los tratamientos de biosólidos evaluados (BS- BC) no presentan diferencia significativa (K-W: 2,513;  $P > 0,113$ ; N: 120); sin embargo, las máximas resistencia se presentan en los ladrillos cerámicos elaborados con biosólido calcinado, y las mínimas resistencias, en los elaborados con biosólido seco; lo anterior es debido, posiblemente, al contenido de materia orgánica presente en el biosólido seco, que afecta la compatibilidad de las mezclas arcilla-biosólidos, presentado en la figura 2B.

El promedio de la resistencia a la compresión de los ladrillos patrón (29.8 MPa) se encuentra cercano a los valores promedio obtenidos en los ladrillos cerámicos elaborados con adiciones del biosólidos seco (25,7 MPa) y del calcinado (28,5 MPa) que supera en la mayoría de los casos los límites mínimos establecidos en la norma NTC-4205 para mampostería estructural (20 MPa) y no estructural (14 MPa).

*Análisis de absorciones de agua de los ladrillos cerámicos evidenciado en la figura 3.* La relación entre la tasa inicial de absorción o absorción capilar (ABC) y el

porcentaje de biosólidos no presenta diferencias significativas (K-W: 8,927;  $P > 0,063$ ; N: 120), en donde se evidencia que los valores promedio registrados fueron de 0,52; 0,50; 0,64; 0,48 y 0,50 g / cm<sup>2</sup> / min para porcentajes del 5, 10, 15, 20 y 30 %, respectivamente;

se encontró que ninguno de los ladrillos incluidos los patrones (0,47 g/cm<sup>2</sup>/min) cumplen con el límite máximo de 0,25 g / cm<sup>2</sup> / min establecido en la norma NTC 4205 para mampostería en general (figura 3A).



**Absorciones de ladrillos cerámicos con biosólidos de aguas residuales en función de los porcentajes de biosólidos adicionados (MPa ± DE) A. Tasa inicial de absorción (TIA), B. absorción sumergida (ABSS) y C. Absorción por ebullición (ABSE).**

Fuente: elaborada por los autores

La absorción sumergida (ABSS) presenta diferencias significativas (K-W: 28,151,  $P < 0,000$ , N: 120) con respecto a los porcentajes, en las que es evidente que esta relación es directamente proporcional; con valores promedio de 16,75; 16,07; 16,23; 17,63 y 17,12 % para porcentajes de 5, 10, 15, 20, y 30 %,

respectivamente, se encontró que estos cumplen para bajos porcentajes de adiciones al igual que los patrones (16,01 %) con el límite máximo de 17 % de la normativa NTC 4205 para mampostería no estructural, presentado en la figura 3B.

En cuanto a la absorción por ebullición (ABSE) y el porcentaje de biosólido adicionado evidenciado en la figura 3C, se presentó una relación directamente proporcional, con diferencias significativas (K-VV: 35,465 P<0,000, N: 120), en donde se evidencia que los valores promedio registrados fueron de 19,96; 19,86; 19,75; 21,39 y 21,31 para porcentajes de 5, 10, 15, 20, y 30 %, respectivamente; se encontró que estos cumplen para bajos porcentajes de adiciones al igual que los patrones (19,56 %) con el límite máximo de 20 % de la normativa NTC 4205 para mampostería no estructural.

Las capacidades de absorción de agua fueron un indicador que permite estimar el tamaño de los poros y la resistencia de los ladrillos elaborados, toda vez que existe una relación directamente proporcional entre el tamaño de poro y la absorción de agua (Weng et al. 2003; García et al. 2013).

## DISCUSIÓN

En la presente investigación se evidencia un aumento en la resistencia a la compresión de los ladrillos cerámicos con adición de biosólidos del 5 y 10 %, con respecto al ladrillo patrón (100 % arcilla); resistencias similares a los reportados en las investigaciones de Weng et al. 2003, Torres et al. (2012), García et al. (2013), Mozo et al. (2015) y Durante et al. (2015), adicionalmente se observó una disminución en la resistencia a la compresión de los ladrillos con los porcentajes superiores al 15 % de biosólido.

El tratamiento aplicado a los biosólidos no demostró diferencias significativas entre biosólido seco y calcinado, en el mejoramiento de las pruebas físicas evaluadas en esta investigación, pero es preciso resaltar que se obtuvieron mejores resultados de resistencia a la compresión en ladrillos cerámicos en la mezcla arcilla-biosólidos calcinados. Lo anterior se corresponde con lo mencionado por Kouakou y Morel (2009) y Navarro, et al. (2008) quienes demuestran que al aplicar tratamiento a los biosólidos, es posible obtener mejores resultados en la resistencia a la compresión y maximizar las propiedades de ladrillo cerámico, lo cual se atribuye a los procesos de oxidación de la materia orgánica durante el proceso de cocción.

En lo que se refiere a la pruebas de TIA, los ladrillos cerámicos evaluados no logran cumplir con el límite máximo establecido por la norma; resultados similares se encuentran en Mozo et al., (2015) quienes registran

el valor máximo de TIA con un porcentaje de adición del 15 %; al mismo tiempo, esta investigación logró evidenciar una relación directamente proporcional entre el porcentaje de adición y la tasa inicial de absorción, caso contrario a lo evidenciado por esta investigación; este comportamiento se atribuye a la porosidad, acorde con el espacio que deja la materia orgánica en la matriz cerámica al ser quemada. Sin embargo, como dicta la normativa colombiana NTC-4205, esto no determina la calidad del ladrillo obtenido, y se hace necesario vigilar el cumplimiento de los requisitos de absorción y resistencia.

Finalmente, los resultados de absorción de agua indican que las adiciones de biosólidos aumentan el grado de absorción de agua, y la porosidad dando como resultado un ladrillo menos compacto y de menor densidad, al igual que en las investigaciones de Durante et al. 2015; Torres et al. 2012 y Hernández et al. 2006 quienes, además, ratifican la relación inversa que existe entre la resistencia a la compresión y la absorción de humedad en las unidades experimentales evaluadas.

## CONCLUSIONES

El análisis de los biosólidos como adiciones en la elaboración de ladrillos cerámicos, permitió verificar que su introducción en las matrices cerámicas no interfiere en la conformación del material, durante el proceso de moldeo prensado y proceso térmico, obteniendo un material final con mayor resistencia a la compresión que los ladrillos fabricados con solo arcilla, siempre y cuando no se superen porcentajes de 15 % de adición. Además, después del proceso térmico, se obtiene un material con mayor grado de contracción, mayor porosidad y, por ende, mayor capacidad para absorber agua, lo cual permite inferir que estos materiales presentarán una tendencia al desgaste y a la hidratación, por lo cual se sugiere ubicarlos en lugares preferenciales en comparación con los ladrillos comerciales elaborados de solo arcillas. De igual forma se recomienda a las industrias de la construcción analizar los resultados y dar continuidad a la evaluación de los procesos para promover su uso.

## BIBLIOGRAFÍA

Abdrakhimov, V.; y Abdrakhimova, E. (2011). Influence of coal-enrichment wastes on the heat and mass transfer in firing light bricks. *Rev. Coke and Chemistry*, 54(2), 72-75.

- Bedoya, K.; Acevedo, J.; Peláez, C.; y Agudelo, S. (2013). Caracterización de biosólidos generados en la planta de tratamiento de agua residual San Fernando, Itagüí (Antioquia, Colombia). *Rev. Salud Pública*, 15(5), 778-790.
- Bolívar, N.; Betancur, J.; y Rodríguez, F. (2015). *Estudio evaluativo del manejo de biosólidos para el caso de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) El Salitre*. Manizales: Universidad de Manizales.
- Cerón, O.; Millán, S.; Espejel, F.; Rodríguez, A.; y Ramírez, R. (2006). *Aplicación de lodos de plantas potabilizadoras para elaborar materiales de construcción*. México: Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Durante, M.; Duarte, A.; y Nascimento, R. (2015). Use of Sewage Sludge as Raw Material in the Manufacture of Roofs. *Materials and Environmental Sciences CMES*, 31-33.
- Freyburg, S.; y Schwarz, A. (2007). Influence of the clay type on the pore structure of structural ceramic. *Rev. Journal of the European Ceramic Society*, 27(2-3), 1727-1733.
- García, C.; García, M.; y Vaca, M. (2013). Resistencia mecánica de ladrillos preparados con mezclas de arcilla y lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales. *Rev. Tecnura*, 17(38), 68-81.
- García, C.; González, A.; y Vaca, M. (2013). Ceramic bricks made from municipal solid waste incineration-derived clay and ashes: a quality study. *Rev. Ingeniería e Investigación*, 33(2), 36-41.
- García, C.; González, A.; y Vaca, M. Encapsulamiento de lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales de la industria automotriz en matrices de arcilla. *Rev. Tecnura*, 17(38), 26-36.
- Hernández, D.; Villegas, J.; Castaño, J.; Paredes, D. (2006). Aprovechamiento de lodos aluminosos generados en sistemas de potabilización, mediante su incorporación como agregado en materiales de construcción. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 8(5), 119-132.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación - ICONTEC. (2000). *Norma técnica Colombiana NTC 4205. Unidades de mampostería de arcilla cocida. Ladrillos y bloques cerámicos*. Bogotá: ICONTEC.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación - ICONTEC. (2000). *Norma técnica Colombiana NTC 296. Dimensiones modulares de unidades de mampostería de arcilla cocida. Ladrillos y bloques cerámicos*. Bogotá: ICONTEC.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación - ICONTEC. (2005). *Norma técnica Colombiana NTC 4017. Métodos para muestreo y ensayos de unidades de mampostería y otros productos de arcilla*. Bogotá: ICONTEC.
- Kouakou, C.; y Morel, J. (2009). Strength and elastoplastic properties of non-industrial building materials manufactured with clay as a natural binder. *Rev. Applied Clay Science*, 44, 27-34.
- Lachemi, M.; Hossain, K.; y Shehata, M. (2007). Characteristics of controlled low-strength materials incorporating cement kiln dust Canadian. *Rev. Journal of Civil Engineering*, 34(11), 485-495.
- Mantilla, G. (2015). Validación de uso de lodos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales tipo UASB como insumo en recuperación de suelos agrícolas. *Rev. ESAICA*, 1(1), 8-23.
- Moreno, H.; Droppelmann, C.; y Verdejo, M. (2006). Evaluación de Carbón Activado Producido a partir de Lodo Generado en una Planta de Tratamiento de Aguas Servidas. *Rev. Información Tecnológica*, 17(3), 9-14.

- Mozo, W.; Gómez, A.; y Camargo, G. (2015). Efecto de la adición de biosólidos (secos) a una pasta cerámica sobre la resistencia mecánica de los ladrillos. *Rev. Ingenierías Universidad de Medellín*, 14(27), 61-78.
- Navarro, C.; Corvalán, D.; y Contreras, S. (2008). *Evaluación de la potencialidad del uso de biosólidos originados en las plantas de tratamiento de aguas servidas en la fabricación de ladrillos*. Universidad Tecnológica Metropolitana. CEDETEMA. CONAME / SAM.
- Rojas, R.; y Mendoza, L. (2012). Utilización de biosólidos para la recuperación energética en México. *Rev. Producción + Limpia*, 7(2), 74-94.
- Shakir, A.; Naganathan, S.; y Mustapha, K. (2013). Properties of bricks made using fly ash, quarry dust and billet scale. *Rev. Construction and Building Materials*, 41, 131-138.
- Torres, P.; Hernández, D.; y Paredes, D. (2012). Uso productivo de lodos de plantas de tratamiento de agua potable en la fabricación de ladrillos cerámicos. *Rev. Ingeniería de Construcción*, 27(3), 145-154.
- Vélez, J. (2007). Los biosólidos: ¿una solución o un problema? Artículo de revisión. *Rev. Producción + Limpia*, 2(2), 57-71.
- Weng, C.; Lin, D.; y Chiang, P. (2003). Utilization of sludge as brick materials. *Rev. Advances in Environmental Research*, 7, 679-685.