

**ELABORACIÓN DE ADOQUINES DE CONCRETO, EMPLEANDO CENIZAS DE
BIOSÓLIDO COMO MATERIAL SUSTITUYENTE DE MATERIA PRIMA.**

CRISTIAN CAMILO PÉREZ ALARCÓN



**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS DE AQUINO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
TUNJA
2016**

**ELABORACIÓN DE ADOQUINES DE CONCRETO, EMPLEANDO CENIZAS DE
BIOSÓLIDO COMO MATERIAL SUSTITUYENTE DE MATERIA PRIMA.**

CRISTIAN CAMILO PÉREZ ALARCÓN

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN
CONSTRUCCIÓN DE NUEVOS MATERIALES**

**DIRECTOR:
WILLIAM RICARDO MOZO MORENO
INGENIERO CIVIL, MAGISTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL**



**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS DE AQUINO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
TUNJA
2016**

Nota de aceptación:

Firma presidente del jurado

Firma jurado

Firma jurado

Tunja, Agosto 16 de 2016.

DEDICATORIA

Este trabajo de grado lo dedico a mis padres; quienes con su dedicación supieron formarme como una persona de bien, con principios éticos y responsabilidad; lo cual fue un gran pilar para mi formación académica, doy gracias por su apoyo incondicional, por sus esfuerzos y sacrificios los cuales permitieron que este sueño fuera posible. Este título de Ingeniero Civil también es de ustedes.

A mis hermanos, Edgar, Fernando, Karen y Danilo Pérez, el mejor regalo que Dios pudo brindarme no solo como hermanos, si no como compañeros incondicionales y apoyos constantes, quienes nunca permitieron que me diera por vencido a pesar de las dificultades que tuve que pasar en mi vida académica, para hacer de este sueño realidad.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor.

A mis padres, Luis Fernando Pérez Sierra y Marlén Alarcón Álvarez, por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien, pero más que nada, por su amor.

A mis hermanos, Edgar Cediél, Fernando Alfredo, Karen Lorena y Heiner Danilo, ya que han sido parte fundamental de mi vida y formación como persona y profesional, a sus buenos consejos y enseñanzas.

A mi abuela Carmen “mi vieja” y mi abuela Aura, por su incondicionalidad para conmigo; y a toda mi familia quien nunca ha dejado de apoyarme, me han acompañado en los malos y buenos momentos como es este gran logro.

A Claudia P. Una persona incondicional, quien me colaboro y siempre estuvo motivándome para sacar adelante este proyecto.

A todos mis compañeros con quienes compartí buenos, malos y gratos momentos, con los que recorrimos este gran camino que hoy nos deja grandes enseñanzas y la satisfacción de haber culminado una de las primeras etapas de nuestras vidas profesionales.

A mi director de tesis, el Ingeniero M.Sc. William Ricardo Mozo, por su apoyo, colaboración y la supervisión brindada en cada etapa de este proyecto; como docente en mi formación profesional y como compañero.

TABLA DE CONTENIDO

DEDICATORIA	4
AGRADECIMIENTOS.....	5
LISTA DE FIGURAS	11
LISTA DE GRÁFICAS.....	12
LISTA DE TABLAS	13
RESUMEN.....	14
ABSTRACT.....	15
INTRODUCCIÓN	16
1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.	18
1.1 DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA.....	18
1.2 JUSTIFICACIÓN	20
1.3 OBJETIVOS	22
1.3.1 Objetivo general.....	22
1.3.2 Objetivos específicos.	22
2. ANTECEDENTES HISTÓRICOS	23
2.1 OBTENCIÓN DE ADOQUINES FABRICADOS CON VIDRIO RECICLADO COMO AGREGADO.....	23
2.2 USO DEL CUESCO DE PALMA AFRICANA EN LA FABRICACIÓN DE ADOQUINES Y BLOQUES DE MAMPOSTERÍA.	24
2.3 UTILIZACIÓN DE LODOS RESIDUALES DE UNA PLANTA DE ANODIZADO DE ALUMINIO, PARA LA FABRICACIÓN DE LADRILLOS Y ADOQUINES.....	25
2.4 APLICACIÓN DE CENIZA DE CASCARILLA DE ARROZ OBTENIDA DE UN PROCESO AGRO-INDUSTRIAL PARA LA FABRICACIÓN DE BLOQUES EN CONCRETO NO ESTRUCTURALES.	26
2.5 USE OF BIO-BRIQUETTE ASH FOR THE DEVELOPMENT OF BRICKS.	26
2.6 FABRICACIÓN DE ADOQUÍN ECOLÓGICO USANDO COMO MATERIA PRIMA BIOSÓLIDO DE PTAR (PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES).	27
2.7 REUTILIZACIÓN DE UN RESIDUO DE LA INDUSTRIA PETROLERA (FCC) EN LA PRODUCCIÓN DE ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS.	28

2.8 VARIATION IN PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF FIRED-CLAY BRICKS INCORPORATING ETP BIOSOLIDS.	29
2.9 APROVECHAMIENTO DEL BIOSÓLIDO – PTAR EL SALITRE.	29
2.10 BIOSÓLIDOS DE PTAR COMO MATERIA PRIMA PARA LA FABRICACIÓN DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN COMO LOS LADRILLOS.	30
3. MARCO LEGAL.	31
3.1 DECRETO 1287 DE 2014 – CRITERIOS PARA EL USO DE LOS BIOSÓLIDOS GENERADOS EN PLANTAS DE TRATAMIENTOS DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES.	31
3.2 Alternativas de uso de los biosólidos.	31
3.3 Inaplicación de los biosólidos en el suelo.	32
3.4 Disposición final de biosólidos.	32
4. MARCO TEÓRICO.....	33
4.1 AGUA RESIDUAL.....	33
4.2 AGUAS NEGRAS.	33
4.3 DEFINICIONES.	33
4.3.1 Aguas negras domésticas.....	33
4.3.2 Aguas pluviales.....	33
4.3.3 Aguas negras combinadas.....	33
4.3.4 Desechos industriales.....	34
4.4 TRATAMIENTO DE AGUAS.....	34
4.5 BIOSÓLIDO.	36
4.5.1 Clasificación de los biosólidos.	37
4.5.2 Aprovechamiento del biosólido PTAR el Salitre.	38
4.5.3 Cenizas de Biosólido.	38
5. MATERIAS PRIMAS.	39
5.1 Cemento.	39
5.1.1 Historia.....	39
5.1.2 Definición.	39
5.1.3 Clasificación de los cementos portland.....	41
5.1.4 Características y Aplicaciones	42
5.2 AGREGADOS.....	43

5.2.1 Definición.	43
5.2.2 Características y aplicaciones.....	43
5.3 AGUA.....	45
5.3.1 Definición.	45
5.3.2 Clasificación del agua en el concreto.....	45
5.4 ADOQUÍN DE CONCRETO.....	45
5.4.1 Definición.	45
5.5 Partes de un Adoquín.	46
5.6 CLASIFICACIÓN.	48
5.6.1 Debido a la forma.....	49
5.6.2 Dimensiones del adoquín.....	51
5.7 PAVIMENTOS DE ADOQUÍN.....	51
5.7.1 Pavimentos de Adoquines de concreto.....	51
5.7.2 Ventajas de los Pavimentos de adoquín.	52
6. MATERIAS PRIMAS.	53
6.1 Materiales	53
6.1.1 Relación de herramientas	53
6.2 Marco metodológico.....	54
6.2.1 Tiempo y Lugar	54
6.2.2 Métodos	55
6.3 DISEÑO METODOLÓGICO.....	55
6.3.1 Definición conceptual de variables.....	55
6.4 RECOLECCIÓN MATERIA PRIMA	56
6.4.1 Material biosólido..	56
6.4.2 Recolección del biosólido.....	56
6.4.3 Revisión del lugar para el muestreo.....	56
6.4.4 Muestreo, almacenamiento, manipulación y quema del biosólido.	57
6.5 CARACTERIZACIÓN DE MATERIAS PRIMAS.....	58
6.5.1 Granulometría granito y arena..	59
6.5.2 Densidad, densidad relativa (gravedad específica), y absorción del agregado grueso.....	60

6.5.3 Densidad y absorción del agregado fino.....	60
6.5.4 Determinación de la resistencia del agregado fino a la degradación por abrasión micro-deval.....	61
6.5.5 Equivalente de arena.....	62
6.5.6 Granulometría biosólido.....	62
6.5.7 Caracterización química del biosólido.....	63
6.5.8 Contenido de humedad.....	63
6.5.9 Trituración de cenizas de biosólido.....	64
6.6.0 Tamizado de las cenizas de biosólido.. ..	64
6.7 ELABORACIÓN DE LOS ADOQUINES.....	65
6.8 ESPECIFICACIONES EN LA ELABORACIÓN DEL ADOQUÍN.	65
6.8.1 DIMENSIONES.....	66
6.8.2 Número de especímenes.....	66
6.9 PROPORCIONES Y MEZCLA DE MATERIALES.	66
6.10 PROCESO DE ELABORACIÓN.	67
6.10.1 Mezclado.....	67
6.10.2 Procedimiento de mezclado.....	68
6.10.3 Elaboración de las piezas de adoquín de concreto.....	69
6.10.4 Maquina compactadora.....	71
6.11 MARCADO Y CODIFICACIÓN DE LOS ADOQUINES DE CONCRETO.	72
6.12 CURADO DE LOS ADOQUINES.....	73
6.13 ANÁLISIS DE APARIENCIA Y MEDICIONES.	73
6.14 ANÁLISIS DE ABSORCIÓN DE AGUA Y DENSIDAD.	74
6.15 ENSAYO DE RESISTENCIA A LA FLEXOTRACCIÓN	76
7. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN.....	77
7.1 CARACTERIZACIÓN MATERIAS PRIMAS.....	77
7.1.1 Granulometría granito.....	77
7.1.2 Granulometría arena.....	78
7.1.3 Granulometría biosólido.....	79
7.1.4 Caracterización química del biosólido.....	81
7.1.5 Cenizas de biosólido.....	82

7.2 ANÁLISIS APARIENCIA Y MEDICIONES	83
7.2.1 Mediciones.....	83
7.2.2 Apariencia.....	83
7.3 ANÁLISIS DE RESISTENCIA A LA FLEXOTRACCIÓN O MODULO DE ROTURA.....	85
7.3.1 Falla a los 7 días.....	85
7.3.2 Falla a los 14 días.....	85
7.3.3 Falla a los 28 días.....	86
7.4 ABSORCIÓN DE AGUA Y DENSIDAD.....	87
8. CONCLUSIONES.....	89
9. RECOMENDACIONES	90
10. BIBLIOGRAFÍA.	91

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Partes de un adoquín (corte).	47
Figura 2. Partes de un adoquín.	47
Figura 3. Adoquín no biselado.	48
Figura 4. Adoquín biselado.	48
Figura 5. Adoquín parcialmente biselado.	48
Figura 6. Clases de Adoquín Tipo 1.	49
Figura 7. Clases de Adoquín Tipo 2.	50
Figura 8. Clases de Adoquín Tipo 3.	50
Figura 9. Ubicación PTAR el Salitre – Bogotá.	56
Figura 10. Revisión del lugar para el muestreo del material biosólido.	57
Figura 11. Almacenamiento, preservación y manipulación.	57
Figura 12. Hornos a gas natural, donde se quemó el biosólido.	57
Figura 13. Tamices seleccionados.	59
Figura 14. Agregados, Granito y Arena.	59
Figura 15. Prueba de absorción de Agua del Granito.	60
Figura 16. Prueba de absorción y densidad de arena.	61
Figura 17. Prueba Micro - Deval.	61
Figura 18. Prueba equivalente de arena.	62
Figura 19. Muestra biosólido.	62
Figura 20. Tamizado biosólido.	63
Figura 21. Prueba de humedad de muestras.	63
Figura 22. Trituración de cenizas de biosólido (Maquina de los Ángeles).	64
Figura 23. Tamizado de las cenizas de biosólido.	64
Figura 24. Ubicación Fábrica Prefabricados Del Sol LTDA.	65
Figura 25. Pesaje y mezclado de materias primas para la elaboración de adoquines de concreto.	68
Figura 28. Arena con Ceniza de Biosólido.	68
Figura 29. Vertido de la mezcla, para la elaboración de los adoquines.	69
Figura 30. Vaciado y extendido de mezcla.	70
Figura 31. Aplicación bicapa y extendido uniforme de mezcla.	70
Figura 32. Compactación y acabado final.	71
Figura 33. Maquina compactadora.	71
Figura 34. Marcado y codificación de los adoquines.	72
Figura 35. Proceso de Curado.	73
Figura 36. Análisis y dimensiones.	73
Figura 37. Secado.	74
Figura 38. Obtención de la masa seca y Enfriamiento a temperatura ambiente.	74
Figura 39. Adoquines sumergidos 24h, para pruebas de (Ma y Mh).	75
Figura 40. Obtención de masa inmersa (Ma).	75
Figura 41. Obtención de masa saturada (Mh).	76
Figura 42. Ensayo a Flexotracción MR.	76
Figura 44. Apariencia adoquines (0%, 5%,10%, 15%, 20% y 25%).	84

LISTA DE GRÁFICAS

Grafica 1. Granulometría granito.....	77
Grafica 2. Granulometría Arena.	78
Grafica 3. Granulometría Biosólido.	79
Grafica 4. Concentración promedio de metales en el biosólido.	82
Grafica 5. Resistencia vs Tiempo 7, 14 y 28 días (Estadísticamente).	86
Grafica 6. Absorción de agua (7, 14 y 28 días).....	87

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Tipos de cemento portland en Colombia.....	42
Tabla 2. Criterio, color aceptación agregado fino.....	44
Tabla 3. Granulometría típica agregados para concreto.....	44
Tabla 4. Partes de un adoquín.....	46
Tabla 5. Clasificación de los adoquines.	48
Tabla 6. Ensayos a realizar, materias primas.	58
Tabla 7. Ensayos a realizar, materias primas.	66
Tabla 8. Proporciones de mezcla por incorporación de cenizas de Biosólido.	67
Tabla 9. Proporciones de mezcla por adoquín.....	67
Tabla 10. Codificación seleccionada para el macado de adoquines.....	72
Tabla 11. Porcentaje de material presente en el Granito.	77
Tabla 12. Porcentaje de material presente en la Arena.	78
Tabla 13. Porcentaje de material presente en el Biosólido.	79
Tabla 14. Características materias primas.....	80
Tabla 15. Caracterización química del biosólido.....	81
Tabla 16. Promedio medidas de adoquín, según cantidad de cenizas de biosólido.	83

RESUMEN

El biosólido es un material procesado a partir de materia orgánica derivada del tratamiento de aguas residuales; es un material rico en nutrientes y estabilizado biológicamente. Para el desarrollo de esta investigación se trabajó con biosólido procedente de la PTAR el SALITRE ubicada en la ciudad de Bogotá. Este material al ser incinerado, reduce su masa y volumen drásticamente, ya que elimina el contenido total de humedad.

El objetivo de esta investigación, es evaluar desde el punto de vista técnico la inclusión de cenizas de Biosólido, como material sustituyente de materia prima para la elaboración de adoquines de concreto; teniendo en cuenta la revisión bibliográfica, donde se establece la cantidad de porcentaje de cenizas de Biosólido (5%, 10%, 15%, 20% y 25%) a sustituir por el agregado fino (arena).

La elaboración de los adoquines de concreto se llevó a cabo en la fábrica de Prefabricados del Sol Ltda. Ubicada en la ciudad de Sogamoso; siguiendo el proceso convencional que esta empresa lleva desarrollando por varios años en la fabricación de adoquines de concreto.

Para un óptimo desarrollo de la investigación, se realizara una caracterización de las materias primas de la elaboración del adoquín en concreto, como lo son; la arena, grava, biosólido. Además de la elaboración de la mezcla, encofrado, compactación, curado del adoquín; Posteriormente se realizará La evaluación técnica, pruebas de absorción de agua, densidad, apariencia, resistencia a la flexo-tracción, parámetros establecidos y descritos en la norma NTC – 2017 (Segunda actualización).

Es importante hacer el estudio para la reutilización de materiales procedentes de Plantas de tratamiento de agua residual, Plantas de Concreto, Siderúrgicas, Residuos de Construcción, etc.; que puedan ser empleados, o llegar a sustituir a los comúnmente empleados en el área de las obras civiles y construcción. Además de emplear nuevas técnicas que puedan contribuir con el medio ambiente, evitando la explotación de recursos naturales para la obtención materiales de construcción.

ABSTRACT

The sewage sludge is processed from organic matter derived from wastewater treatment equipment; It is a material rich in nutrients and biologically stabilized. For the development of this research was working with biosolids from the treatment plant wastewater the PTAR EL SALITRE located in the city of Bogota. This material to be incinerated drastically reduces its mass and volume, as it removes the total moisture content.

The objective of this research is to evaluate from a technical point of view; the inclusion of sewage sludge ash as substituent feedstock material for the elaboration of concrete pavers; taking into account the literature review, where the percentage amount of sewage sludge ash (5%, 10%, 15%, 20% y 25%) to replace fine aggregate (sand) is established.

The elaboration of concrete pavers was carried out in PREFABRICADOS DEL SOL LTDA. Located in the city of *Sogamoso*; following the conventional process that the company has been developing for several years in the manufacture of concrete pavers.

For optimum research development, characterization of raw materials for the preparation of adoquin in particular, as they are be carried out; sand, gravel, sewage sludge and sewage ash. Besides preparing the mixture, fromwork, compaction, curing cobble, then the technical evaluation, testing wáter absotion, density, appearance, resistance to flexo-traction, parameters set out and described in NTC – 2017 standard is conduct.

It is important to study for the reuse of materials from plants wastewater treatment Plants Concrete , steel , construction waste , etc. they can be used or eventually replace those commonly used in the area of civil and construction works. In addition to employing new techniques which can contribute to the environment avoiding the exploitation of natural resources for obtaining construction materials.

INTRODUCCIÓN

El objetivo fundamental del tratamiento de las aguas residuales, es remover y estabilizar los diferentes contaminantes, mediante la combinación de procesos químicos, físicos y biológicos para la degradación de desechos orgánicos e inactivar gran número de agentes patógenos; con el fin de evitar problemas en la salud de las personas y del medio ambiente. En estos procesos se generan subproductos, entre los que se encuentran los lodos y biosólidos. Estos últimos, son definidos como restos orgánicos sólidos, semisólidos o líquidos que resultan del tratamiento del proceso de deshidratación de lodos en las PTAR “Planta de tratamiento de aguas residuales”. El tratamiento es esencial para minimizar la carga contaminante, producto de residuos domésticos, industriales, comerciales y de agricultura en cantidades y aumentos importantes.¹

El estado actual de los afluentes y principales fuentes de abastecimiento de agua potable se estaban viendo seriamente afectados por la disposición de las aguas residuales sin ningún tipo de tratamiento. Debido a la gran problemática que enfrentamos hoy en día por la escasez de agua potable y la contaminación de los afluentes; las entidades ambientales, han restringido la descarga directa de las aguas residuales y todo tipo de lodos o biosólidos; ya que estos productos contienen grandes cantidades de metales pesados, agentes patógenos, tóxicos y sustancias orgánicas, etc. Compuestos que no son eliminados totalmente bajo el proceso de tratamiento de agua, pudiendo generar complicaciones en la salud humana y de cualquier especie que haga uso del líquido.² Por otra parte la construcción y puesta en marcha de nuevas estaciones o plantas de tratamiento de agua residuales, han conseguido la disminución de lodo y biosólido; esto gracias al aprovechamiento en múltiples actividades y programas dispuestos para dar utilidad a dichos productos.

Los programas ambientales de las PTAR “Planta de tratamiento de aguas residuales”, están enfocados, a dar prioridad al manejo de lodos o biosólidos; ya que estos pueden ser empleados en diferentes actividades, como por ejemplo; las relacionadas con usos de tipo agrícola, recuperación de suelos, utilización en la estabilización de taludes, actividades forestales, cobertura de rellenos sanitarios y como materia prima para la elaboración de nuevos materiales en el campo de la construcción.³ Esta última toma gran importancia teniendo en cuenta el alto grado de producción y demanda que se maneja en el sector de la construcción,

¹ Departamento de sanidad de Estados Unidos. (1995). *MANUAL DE TRATAMIENTO DE AGUAS NEGRAS*, P.31– 40. LIMUSA – Noriega Editores.

² Juan Alberto Vélez Zuluaga. (2007). *LOS BIOSÓLIDOS: ¿UNA SOLUCIÓN O UN PROBLEMA? P+L*. P 1-10. www.lasallista.edu.co

³ Gian Paolo Dáguer G. (2004). *GESTIÓN DE BIOSÓLIDOS EN COLOMBIA*. Planta de Tratamiento de Aguas Residuales El Salitre. Universidad de La Salle.

convirtiéndolo en una opción ventajosa y tentadora, ya que el biosólido tendría una utilidad adicional, generando ideas, y contribuyendo al medio ambiente, ya que se disminuiría la contaminación de las fuentes hídricas, y se estaría aprovechando un material que puede remplazar a otro que por su explotación genere impactos al medio ambiente.

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.

1.1 DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA.

Hoy en día se está viviendo una gran problemática ambiental, debido a la contaminación de las fuentes hídricas. Como se sabe, el agua tiene un proceso que se está alterando y afecta directamente al ser humano, ya que cuando se vierten aguas negras (residuales), sin tratar a las fuentes de hídricas, se está generando un gran impacto negativo al medio ambiente, ya que estas aguas son portadoras de diferentes elementos o compuesto como; metales pesados, materia orgánica, agentes patógenos que puede ser tóxicos y peligrosos para todo tipo de especie marina y para la humanidad en general.⁴

Es por eso que se busca reducir al máximo, el número de impactos generados al medio ambiente. Debido a esto la normatividad ambiental, establece el derecho a gozar de un ambiente sano; por lo cual viene promoviendo el incremento en los niveles de tratamiento de los vertimientos de los sistemas de alcantarillado municipal, lo que ha originado que en el país se haya aumentado la construcción de sistemas de tratamiento de aguas residuales municipales.⁵

En Boyacá se está llevando a cabo la construcción de tres PTAR en las ciudades de , Tunja, Duitama y Sogamoso. La ejecución de estos proyectos, trae consigo beneficios para la salud de los seres humanos y el medio ambiente, permitiendo así un desarrollo sostenible; ya que se reduce la descarga contaminante en todo tipo de fuente hídrica, ya sea superficial o subterránea; además de reducir el riesgo a la salud pública y la afectación a la calidad de vida de poblaciones cercanas a los puntos de vertimiento de estas aguas. Lo descrito anteriormente es sin duda un resultado muy positivo y un gran avance en el desarrollo del tratamiento de las aguas residuales, pero no se puede dejar de lado, que este tipo de procesos generará otros subproductos, como los lodos o biosólidos; material del cual se plantea la problemática de esta investigación.

El manejo adecuado de los subproductos del tratamiento a las aguas residuales (lodos o biosólidos), es un tema que día a día toma más fuerza y el cual se convierte en el objeto de esta investigación. Según sus características el contenido de metales pesados, agentes patógenos; hacen de este residuo un material potencialmente contaminante, el cual requiere de un adecuado manejo y

⁴ Juan Alberto Vélez Zuluaga. (2007). *LOS BIOSÓLIDOS: ¿UNA SOLUCIÓN O UN PROBLEMA? P+L*. P 1-10. www.lasallista.edu.co

⁵ Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2014). *DECRETO 1287 DE 2014 – CRITERIOS PARA EL USO DE LOS BIOSÓLIDOS GENERADOS EN PLANTAS DE TRATAMIENTOS DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES*. Ley 142 de 1994. 1-20

disposición. El biosólido con el que se desarrolló la investigación procede de la Planta de tratamientos de agua residual “EL SALITRE” de la ciudad de BOGOTÁ.

En Colombia las plantas de tratamiento de agua residual, generan 274 toneladas de biosólidos al día. El 97% de esta producción es generada por cuatro plantas; El Salitre ubicada en la ciudad de Bogotá, Cañaveralejo ubicada en la ciudad Cali, San Fernando ubicada en la ciudad de Medellín y Rio Frio ubicada en la ciudad Bucaramanga. Estas cifras hacen necesario el estudio de nuevas alternativas, las cuales permitan un manejo adecuado de estos residuos, que pueden llegar a ser reutilizados, o como en esta investigación, una alternativa que sustituye el material granular fino “Arena”, uno de los agregados principales en la elaboración de adoquines de concreto. Esto con el fin de evitar el vertimiento de residuos en las fuentes hídricas.

Aunque en Colombia la normativa en cuanto al manejo y aprovechamiento de los biosólidos es mínimo, pero debido a la generación de tanto material se han realizado investigaciones, identificando la mayor cantidad de formas de aprovechamiento garantizando la sostenibilidad ambiental del tratamiento de las aguas residuales. A pesar de que las técnicas de aprovechamiento son nuevas en el país, ofrece opciones comerciales a partir de su transformación en nuevos productos, de acuerdo con esto, hay que tener cierta precaución, sobre todo en su tratamiento y en su utilización, ya que todos poseen diferentes porcentajes en cantidades de compuestos; a su vez nutrientes, plaguicidas, disolventes industriales, colorantes, plastificantes, contaminantes, protozoos y nematodos, que pueden causar biodegradación, y transmitir virus y enfermedades. Es por esto que es necesario tener en cuenta normas o leyes internacionales, que basadas en la experiencia del manejo de biosólido, permita aportar gran aplicabilidad o uso de este material en el país.⁶

En general; la demanda de materia prima para la elaboración de materiales de construcción va en aumento, y los impactos generados cada vez son más graves. Por lo cual se planteó, un estudio de nuevos materiales, los cuales pudieran ser reutilizados para reducir estos impactos causados. Hay diversas formas de aprovechar el biosólido, contempladas por normativas nacionales y extranjeras. Este material es la principal fuente de investigación; ya que fue sometido a quema, y del cual se obtuvo el material base para el desarrollo de la investigación “cenizas de biosólido”, el cual reemplazo el agregado fino “Arena”, en determinados porcentajes (5; 10, 15, 20 y 25%), para demostrar que puede ser un material implementado en la elaboración de adoquines de concreto, cumpliendo con los parámetros físicos y mecánicos, exigidos por la normativa nacional, encargada de los Adoquines de concreto para pavimentos.

⁶ Gian Paolo Dáguer G. (2004). *GESTIÓN DE BIOSÓLIDOS EN COLOMBIA. Planta de Tratamiento de Aguas Residuales El Salitre. Universidad de La Salle*

1.2 JUSTIFICACIÓN

Actualmente el sector de la construcción está en auge, lo cual demanda gran cantidad de producción de materiales derivados de recursos naturales. Entre los principales para el desarrollo de esta investigación están estos diferentes tipos de agregados como; arena, granito y cemento, el cual está compuesto por agregados como la cal, mineral de hierro etc. La problemática de explotación de estos agregados radica en los impactos que genera al medio ambiente; como la atmosfera, los suelos y terrenos donde se practica, en las aguas superficiales y subterráneas.

Los impactos generados a la atmósfera mediante emisiones sólidas, se evidencia en el polvo emitido en las propias actividades extractivas, durante la voladura y arranque de material, o durante el proceso de carga, transporte y descargue de los mismos. Además de tener en cuenta los gases contaminantes generados por la combustión de la maquinaria empleada, las emisiones en voladuras y las directamente relacionadas con combustión de carbón.

En el terreno se presenta; deforestación, perdida de suelo fértil, además de modificar el relieve, lo que genera un posible aumento de la escorrentía, provocando la erosión del terreno, desestabilización de taludes por sobrecargas alterando el nivel freático.⁷

El enorme consumo de agua que requiere la actividad minera, llega a secar pozos de agua y manantiales; ya que cuando las grandes cantidades de roca que contienen minerales sulfatados, son excavados en tajo abierto o en vetas en minas subterráneas, estos materiales reacciona con el aire o con el agua para crear ácido sulfúrico. Cuando el agua alcanza cierto nivel de acidez, un tipo de bacteria común llamada (Tiobacilus Ferrooxidante), puede aparecer acelerando los procesos de oxidación y acidificación, lixiviando aún más los residuos de metales de desecho. El ácido lixiviara la roca mientras que la roca fuente esté expuesta al aire y al agua. El ácido es transportado desde la mina por el agua, las lluvias o por corrientes superficiales y posteriormente depositado en los estanques de agua, arroyos, ríos, lagos cercanos. Llegando a destruir cualquier especie que viva en el agua y hasta volverla totalmente inservible.⁸

Además de provocar conflicto entre los habitantes en donde son realizadas estas prácticas; debido a que no se ejecuta un desarrollo sostenible. Es por esto que se recurre, a la implementación de diferentes técnicas, de obtención de materias primas que sustituyan las principalmente empleadas, desarrollando

⁷ P. Higuera & R. Oyarzun, (2006). *Impactos de la minería en el medio natural*. Curso de Minería y Medio Ambiente. <http://www.uclm.es/users/higuera/mam>

⁸ Eco-sitio, (2009). *Contaminación del agua a causa de la minería*. <http://www.eco-sitio.com.ar>

investigaciones que permitan determinar qué tipos de materiales pueden ser reutilizados sin importar su procedencia y en que porcentajes pueden llegar a sustituir los convencionalmente empleados.

Del tratamiento de las aguas residuales, se generan subproductos como el biosólido, que puede ser aprovechado evitando impactos al medio ambiente, como los recursos hídricos y el suelo. Este material era vertido a las fuentes hídricas sin ningún tipo de tratamiento o manejo.

El estudio y aprovechamiento de residuos, se ha investigado por más de 30 años, y hace más de una década que los países desarrollados poseen normativas que regulan la utilización de los Biosólidos en distintas actividades, una de ellas la norma EPA 40 CFR-503 de Estados Unidos⁹, en la que establecen límites y parámetros en las concentraciones de metales pesados, además de los indicadores de contaminación fecal como coliformes y E-coli.

Debido a las múltiples actividades de aprovechamiento, como agricultura, obras de ingeniería etc., en las que puede emplearse el biosólido; se planteó en esta investigación, como material sustituyente de agregados de materiales de construcción; como una nueva opción que permita implementar nuevos materiales, que cumplan la misma función que los comúnmente empleados en el sector, además de brindar características iguales o similares a las que establecen las normas, y sobre todo que contribuya con la mejora del medio ambiente.

Los adoquines son empleados, desde zonas para tránsito peatonal (andenes, plazas, patios para juegos, instalaciones deportivas, etc.) hasta las de tránsito pesado (calles, carreteras, terminales de transporte, carga y puertos, pistas para aeropuertos) e inclusive para fines decorativos. Uno de los propósitos de esta investigación, es dar aprovechamiento a estos residuos generados en la PTAR, reduciendo la contaminación; en los vertederos, fuentes hídricas, minimizando impactos ambientales y favoreciendo a la población en general.

El ministerio de vivienda ciudad y territorio mediante el decreto 1287 de 2014; establece criterios para el uso y aplicabilidad de los Biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales. En el que también establece límites y parámetros en la concentración de metales pesados y microbiológicos; además de su disposición final. La norma RAS 2000, también tiene definido el termino Biosólido y reglamenta la gestión de los mismos.

⁹ Agencia de protección ambiental, (1994). *Estándares para la utilización o eliminación de lodos de depuradora*. www.epa.gov/biosolids/plain-english-guide-epa-part-503-biosolids-rule

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo general.

- ✚ Evaluar desde el punto de vista técnico, la alternativa de incluir cenizas de biosólidos como materia prima para la fabricación de adoquines de concreto para pavimentos.

1.3.2 Objetivos específicos.

- ✚ Realizar un diagnóstico del proceso de elaboración del adoquín de concreto, de la planta PREFABRICADOS DEL SOL LTDA. de la ciudad de Sogamoso; contemplando variables de proceso y la calidad de los elementos.
- ✚ Determinar las propiedades técnicas del adoquín, con base en la Norma Técnica Colombiana 2017. (Ensayo a la flexotracción, absorción de agua y densidad).
- ✚ Establecer el porcentaje óptimo de cenizas de biosólidos a incluir como materia prima para la elaboración del adoquín. (0%, 5%, 10%, 15%, 20% y 25%).

2. ANTECEDENTES HISTÓRICOS

El proceso de tratamiento de las aguas residuales, genera diversos materiales como los lodos, que al ser tratados se transforman en subproducto denominado biosólidos. Estos materiales se deben caracterizar biológica, física y químicamente, para su total aprovechamiento. Este material estabilizado, puede ser empleado en diversas actividades, como por ejemplo, en la estabilización de taludes, suelos erosionados, actividades agrícolas, cobertura de rellenos sanitarios y como aditivo sustituyente de diversos agregados que hacen parte del sector de la construcción.¹⁰

En este caso, tras realizar el proceso de combustión del biosólido; se le da una utilidad a las cenizas de Biosólido, con el fin de formar parte de una de las materias primas, en la elaboración de adoquines de concreto. Su inclusión como sustituyente del agregado fino (Arena), ha demostrado ser una buena opción desde el punto de vista técnico. En países vecinos como Venezuela, Ecuador y hasta en nuestro propio país Colombia, se han realizado investigaciones, que aprueban el uso alternativo de las cenizas de biosólido como una opción factible, de tal manera que también se está contribuyendo con el medio ambiente, ya que se disminuye la contaminación a las fuentes hídricas, que son los principales vertederos de este tipo de materiales.

Los antecedentes en cuanto a la implementación de cenizas de biosólido, varían desde análisis teóricos, hasta investigaciones de tipo práctico, en los que se evalúa la posibilidad de emplear este tipo de material, teniendo en cuenta la desventaja que representa la contaminación de este material si no se le da un manejo adecuado.

2.1 OBTENCIÓN DE ADOQUINES FABRICADOS CON VIDRIO RECICLADO COMO AGREGADO.¹¹

En esta investigación los autores estudiaron la influencia del vidrio molido, sobre la resistencia al desgaste de adoquines de hormigón. Para la veracidad de los datos, se basaron en 2 normas; la norma “EN 1338_2003 – concrete paving blocks. Requirements and test methods”, “Norma ecuatoriana – INEN 1488 – adoquines requisitos”; para la caracterización de los adoquines fabricados.

¹⁰ Juan Alberto Vélez Zuluaga. (2007). *LOS BIOSÓLIDOS: ¿UNA SOLUCIÓN O UN PROBLEMA? P+L*. P 1-11. www.lasallista.edu.co

¹¹ Daniel Idalgo, Ricardo Poveda, Víctor Cárdenas PhD. (2013). Obtención de adoquines fabricados con vidrio reciclado como agregado. *Escuela politécnica nacional*. Quito – Ecuador.

La mezcla que se empleó en la fabricación de los adoquines, fue diseñada en base a dos granulometrías de vidrio diferente, los porcentajes manejados para la dosificación de la mezcla, fueron de 5%, 15%, 25% y 35% de vidrio.

A partir de los resultados obtenidos, pudieron concluir, que la incorporación de vidrio como agregado en adoquines, incide de manera positiva sobre la resistencia al desgaste; igualmente la resistencia a la compresión exigida por la norma es alcanzada. Sin embargo su elaboración resulta más costosa que los adoquines convencionales.

2.2 USO DEL CUESCO DE PALMA AFRICANA EN LA FABRICACIÓN DE ADOQUINES Y BLOQUES DE MAMPOSTERÍA.¹²

Para esta investigación el autor propuso la implementación de cuesco de palma, para la fabricación de adoquines en concreto.

La palma africana es también conocida como palma aceitera, ya que de ella se extrae el aceite comestible, además de emplearse en otras actividades como la medicina, en la industria textil, licores, metalúrgica, implementos de aseo para uso personal y domestico etc., siendo un producto de alta demanda.

El cuesco posee una alta resistencia, este se obtiene mediante la trituración y calentamiento de la palma de aceite.

El objetivo que planteo el investigador para esta investigación fue sustituir parcialmente el consumo de materias primas convencionales; (agregado grueso y fino parcialmente), ya que son escasos o ubicados a grandes distancias, reduciendo así costos parciales y finales en los proyectos arquitectónicos y de ingeniería, donde el concreto es su principal insumo.

Se plateo un análisis comparativo entre dos mezclas de concreto, una muestra patrón hecha con agregados tradicionales empleados en la ciudad de Barranquilla como lo es la grava triturada, arena y la muestra hecha con un 25% de cuesco combinado.

Se realizó un análisis de resistencia a la compresión a los 28 días, comparando las 2 mezclas. Los resultados obtenidos fueron óptimos, ya que el ensayo a flexión según la Norma NTC – 2017, la resistencia de cada adóquín no debe ser menor a 3.5 MPa y en promedio a 4.5 MPa. Los resultados obtenidos en la investigación,

¹² Jorge Buzón Ojeda, (2009). Uso del cuesco de palma africana en la fabricación de adoquines y bloques de mampostería. *Seventh LACCEI Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology (LACCEI'2009) "Energy and Technology for the Americas: Education, Innovation, Technology and Practice"* June 2-5, 2009. San Cristóbal, Venezuela.

arrojaron que la resistencia promedio obtenida para los adoquines a los 28 días fue de 9.1 MPa, para los adoquines con el 10% de cuesco fue de 6.71Mpa. los valores reflejan la utilización de agregados secos, densos y lavados y con un buen grado de compactación, gracias a estas cualidades se produce un mortero más denso y a su vez mucho más resistente y en mayor medida las resistencia obtenida con adoquines peatonales a los 28 días satisface las exigencias establecidas por la norma

2.3 UTILIZACIÓN DE LODOS RESIDUALES DE UNA PLANTA DE ANODIZADO DE ALUMINIO, PARA LA FABRICACIÓN DE LADRILLOS Y ADOQUINES.¹³

Los investigadores de este artículo científico, lo que buscaban era reducir un impacto ambiental, generado por la disposición final de los lodos provenientes de los filtros prensa, de los procesos de anodizado y la planta de efluentes.

El objetivo general de esta investigación era utilizar los lodos residuales, como materia prima para la fabricación de ladrillos y adoquines. Emplearon los lodos residuales reemplazando un porcentaje de los materiales comúnmente empleados para la dosificación de las piezas de adoquín de concreto, por el lodo residual.

En este caso los componentes empleados fueron, cemento, arena, piedra, y lodo residual tanto seco como húmedo. Los porcentajes reemplazados en la dosificación, fueron del 10% y 20%, dejando las muestras 28 días de curado para que realizaran las pruebas de compresión.

La pruebas realizadas con las muestras en base al lodo seco y lodo húmedo, donde la muestra húmeda al 20% se rompió antes de realizar el ensayo, la muestra con el 10% de humedad dio una resistencia muy baja en el ensayo a compresión, de 6,6 (Kg/cm²) con respecto a una mezcla comúnmente usada la cual obtiene una resistencia de 86,4 (Kg/cm²) y las mezclas realizadas con material seco del 10 y 20% obtuvieron mayor resistencia a la compresión. Sin embargo ninguna cumplió los parámetros establecidos en la norma NTE 1488:87 por lo que decidieron recomendar el material para producción, con uso decorativo.

¹³ Iván Granada, Gustavo Plaza; (2009). Utilización de lodos residuales de una planta de anodizado de aluminio, para la fabricación de ladrillos y adoquines. *Corporación ecuatoriana de aluminio Cedal S.A.* Ecuador.

2.4 APLICACIÓN DE CENIZA DE CASCARILLA DE ARROZ OBTENIDA DE UN PROCESO AGRO-INDUSTRIAL PARA LA FABRICACIÓN DE BLOQUES EN CONCRETO NO ESTRUCTURALES. ¹⁴

En esta investigación el autor, logro desarrollar una aplicación para un residuo agro-Industrial; como lo es la ceniza de cascarilla de arroz (CCA) resultante del proceso de combustión controlada de las cascarilla de arroz, este proceso de quema los realizaron en la arrocería la esmeralda, ubicada en Jamundí – Cali.

La ceniza resultante del proceso de combustión de la cascarilla de arroz, presento un porcentaje de sílice amorfa del 29,38%. Con el objetivo de ser incorporada como material, en las mezclas de concreto; con el fin de estudiar su efecto como puzolana en la sustitución parcial de cemento Portland Tipo I y como agregado fino, en la fabricación de bloques no estructurales y bloques macizos.

Se hicieron dos tipos de mezcla, cemento: agregado 1:6 y 1:8, en las que se incluyeron tres diferentes porcentajes de cenizas, 10%, 20% y 30%. Estos porcentajes de cenizas, serían los sustituyentes del cemento y el agregado fino; para posteriormente realizar los ensayos de resistencia a la compresión en los respectivos días de curado, 7 y 28 días.

Los resultados obtenidos mostraron que la relación cemento: agregado de 1:6 y la adición del 20% de CCA actuando como filler y puzolana es la composición óptima para el uso de este residuo agro-industrial en una aplicación como los bloques no estructurales. Además se encontró que el proceso de mezclado en dos etapas mejora la calidad del producto, aumentando las propiedades mecánicas de las mezclas elaboradas a 28 días de curado.

2.5 USE OF BIO-BRIQUETTE ASH FOR THE DEVELOPMENT OF BRICKS. ¹⁵

En esta investigación, el autor implementa la gestión de residuos sólidos, de acuerdo a la necesidad, por el desarrollo de materiales sostenibles, con un adecuado manejo de los desechos.

De acuerdo a esto se realizó un estudio de la utilización de cenizas Bio – Briquetas, para el desarrollo de ladrillos. Con el objetivo de evaluar la factibilidad de reemplazar la arena empleada como materia prima en la elaboración de ladrillos de concreto, por cenizas de residuos. Los porcentajes teniendo en cuenta

¹⁴ Pedro Matthey, Rafael Robayo. (2014). *APLICACIÓN DE CENIZA DE CASCARILLA DE ARROZ OBTENIDA DE UN PROCESO AGRO-INDUSTRIAL PARA LA FABRICACIÓN DE BLOQUES EN CONCRETO NO ESTRUCTURALES*. Universidad del Valle – Cali. Colombia.

¹⁵ V. Sakhare, R. R. (2015). *USE OF BIO-BRIQUETTE ASH FOR THE DEVELOPMENT OF BRICKS*. Science Direct, P. 684- 689

que de un 100%, el 10% corresponde al cemento, y el 90% restante a la arena; los porcentajes que definieron la sustitución del agregado fino fueron los siguientes: 5%, 15%, 25%, 35%, 45% y el 55%.

Para un buen desarrollo de la investigación, el producto desarrollado, se ensayó de acuerdo a las normas de la india (IS), para la densidad, resistencia a la compresión, absorción de agua y eflorescencias, junto con la durabilidad y propiedades térmicas. Se investigó el efecto de la adición de las cenizas de residuos en las propiedades del ladrillo. De esto se pudo concluir que el 35% de cenizas, el 55% en peso de la arena y el 10% en peso de cemento, fueron la composición de la mezcla optima, para los ladrillos con cenizas de residuos, desarrollados que cumplieron con las propiedades de acuerdo a las normas de la india (SI). No se recomienda emplear los ladrillos como elementos estructurales.

2.6 FABRICACIÓN DE ADOQUÍN ECOLÓGICO USANDO COMO MATERIA PRIMA BIOSÓLIDO DE PTAR (PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES). ¹⁶

En esta investigación el autor evaluó la posibilidad de incluir biosólidos procedentes de la PTAR el Salitre; como sustituyente de materia prima para la elaboración de adoquines de concreto.

Lo primero que realizo el autor, fue la caracterización física, biológica y mecánica de los materiales que empleo en la elaboración de los adoquines. Se determinaron cuatro tipos de mezclas, empleando los siguientes porcentajes de biosólido a sustituir (0%, 5%, 10% y 15%); Y se tuvieron en cuenta tres fechas para el curado (7, 28 y 42 días).

Se realizaron las pruebas físicas y mecánicas a los adoquines, en donde se evaluó el porcentaje de incorporación de biosólido. Las pruebas mecánicas de resistencia a la flexotracción, arrojaron datos de los que se pudo concluir que la sustitución del 5% de biosólido es acorde con los resultados exigidos en por la norma, las demás mezclas son rechazadas para su uso en pavimentos de adoquín. De igual manera se pudo concluir que el adoquín que era sometido a mas días de curado, presentaba perdida por desmoronamiento y en casos no era posible realizar la falla debido a que es un material muy absorbente por lo que también se rechazan estos elementos.

¹⁶ Urrutia María, (2015). *FABRICACIÓN DE ADOQUÍN ECOLÓGICO USANDO COMO MATERIA PRIMA BIOSÓLIDO DE PTAR (PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES)*. Universidad Santo Tomas. Colombia.

2.7 REUTILIZACIÓN DE UN RESIDUO DE LA INDUSTRIA PETROLERA (FCC) EN LA PRODUCCIÓN DE ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS. ¹⁷

Los investigadores de este proyecto pretendían analizar la viabilidad de utilizar un residuo de catalizador gastado (**FCC**) del proceso de craqueo catalítico, procedente de una empresa petrolera que pertenece a Colombia; en la fabricación de elementos constructivos tipo bloques y adoquines.

En esta investigación los autores proponen sustituir el cemento por *FCC*, preparando morteros de cemento portland con proporciones de *FCC* entre 0 y 70%, con el fin de evaluar la resistencia a la compresión, con un tiempo de curado de 7, 14 y 28 días.

Los elementos constructivos son bloques huecos y adoquines. Los bloques huecos cuentan con área de 400mm x 100mm y con una altura de 200mm, definidos por la norma NTC 4076 – (*UNIDADES “BLOQUES Y LADRILLOS” DE CONCRETO, PARA MAMPOSTERÍA NO ESTRUCTURAL INTERIOR Y CHAPAS DE CONCRETO*). Los adoquines poseen un rectángulo inscrito de 200mm x 90 mm y con una altura de 80mm, que están definidos por la norma NTC 2017. Para efectos de comparación se utilizaron bloques comerciales.

Los elementos fueron sometidos a curado bajo inmersión en agua durante 28 días, para después evaluar sus propiedades, resistencia a la compresión en bloques y cilindros, resistencia a la flexotracción en adoquines y absorción. Complementariamente se realiza un estudio del proceso de hidratación, mediante técnicas de difracción de rayos X (DRX) y análisis térmico diferencial (TG/DTG).

Según los resultado obtenidos, indican que es factible la incorporación de *FCC* al concreto, sustituyendo al cemento hasta un 4.5%. Obteniendo un elemento con características mecánicas similares a las de uno comercial.

En cuanto a los adoquines, estos presentaron en la prueba de resistencia a la flexotracción, resultados superiores al que exige la norma NTC 2017, que es de 3.8 MPa como elemento individual. En cuanto a la prueba de absorción, los elementos constructivos producidos, no cumplen lo especificado con la norma.

¹⁷ E. Caicedo, R. Mejía, M. Gordillo y J. Torres, (2015). *REUTILIZACIÓN DE UN RESIDUO DE LA INDUSTRIA PETROLERA (FCC) EN LA PRODUCCIÓN DE ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS*. Universidad del Valle (CENM), Cali, y Materiales y Medio Ambiente, de la Universidad Nacional, Sede Palmira, Colombia. Derechos, Pontificia Universidad Javeriana. P. 135 - 154

2.8 VARIATION IN PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF FIRED-CLAY BRICKS INCORPORATING ETP BIOSOLIDS.¹⁸

En esta investigación el autor investigo la posibilidad de incorporar los biosólidos generados en la planta de tratamiento de agua residual de Melbourne – Australia; en ladrillos de arcilla sometidos a cocción.

Primero se realizó la caracterización física, biológica, mecánica y química de los materiales que se emplearon en la elaboración de los ladrillos. Se determinaron cinco tipos de mezclas, empleando los siguientes porcentajes de Biosólido (5%,15%, 25%, 35% y 50%). Sometiendo los ladrillos elaborados a una temperatura de cocción de 1020 °C durante 3 horas.

Se realizaron las pruebas físicas y mecánicas a los ladrillos, evaluando la incorporación de biosólido. Se evaluaron pruebas por contracción, pérdida de peso por ignición, absorción de agua, densidad, tasa de absorción, resistencia a la compresión, la eflorescencia y análisis de lixiviado.

La resistencia a la compresión de los ladrillos con incorporación de biosólidos, estaba entre un rango de 24.9 a 37.0 MPa; estos parámetros cumplían con los que exigen los estándares australianos.

Por otra parte se pudo concluir que los adoquines pueden ahorrar hasta un 5% de la energía durante la cocción en un horno eléctrico, lo que es muy importante en términos de desarrollo sostenible.

Los resultados del análisis de lixiviado mostraron que la concentración de metales pesados, es significativa y mucho más baja que los límites establecidos por norma.

2.9 APROVECHAMIENTO DEL BIOSÓLIDO – PTAR EL SALITRE.¹⁹

Las actividades de cobertura se realizan con una mezcla biosólido-suelo en proporciones iguales, para lo cual se cuenta con una zona de manejo, en la que se recibe el biosólido, se extiende, y se seca atmosféricamente, antes de realizar la mezcla con suelo.

- **Recepción del material:** En esta primera etapa se recibe el biosólido de la PTAR El Salitre.

¹⁸ Aruna Ukwatta, Abbas Mohajerani, N. E. (2016). *VARIATION IN PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF FIRED-CLAY BRICKS INCORPORATING ETP BIOSOLIDS*. Science Direct, P. 76 - 85

¹⁹ Tratamiento de aguas y lodos PTAR Salitre. (s.f.). *ACUEDUCTO AGUA Y ALCANTARILLADO DE BOGOTÁ*. Recuperado el 26 de Diciembre de 2014, de www.acueducto.com.co

- **Extensión y secado:** Con el fin de disminuir el volumen del biosólido, éste se extiende y seca atmosféricamente en módulos de secado. Esta actividad permite mejorar la calidad microbiológica del biosólido y reducir la generación de olores.
- **Volteo periódico:** Esta actividad garantizará que el material se seque de manera homogénea.
- **Mezcla con suelo:** Luego de transcurrido el tiempo de secado, el biosólido se lleva a la zona que requiere cobertura, en donde se mezcla en proporción 1:1 con suelo.
- **Aprovechamiento de la mezcla:** La mezcla biosólido – suelo es aprovechada en las zonas clausuradas y que requieren la conformación de la cobertura vegetal.

2.10 BIOSÓLIDOS DE PTAR COMO MATERIA PRIMA PARA LA FABRICACIÓN DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN COMO LOS LADRILLOS.²⁰

En esta investigación el autor evaluó técnicamente la incorporación de biosólidos en la fabricación de ladrillos de arcilla.

Para su desarrollo realizo primero, la caracterización de las materias primas como la arcilla y biosólido, determinando los parámetros físicos, biológicos y mecánicos de los agregados. Se establecieron cuatro tipos de mezclas, en los que se incorporaron los siguientes porcentajes de biosólido (0%, 5%, 10% y 15%). Sometiendo a tres niveles de cocción los ladrillos elaborados (950, 1000 y 1050 °C).

Se evaluó la calidad de los elementos cerámicos, mediante la aplicación de ensayos mecánicos de resistencia a la compresión, según establece la norma técnica 4017 para mampostería estructural y mampostería no estructural. Comparando resultados con los ya establecidos en la NTC 4205 - Unidades de mampostería no estructural; se pudo concluir que los resultados presentados en la prueba mecánica a la compresión, varia proporcionalmente con el porcentaje de biosólido y la temperatura de cocción. Los resultados fueron favorables con hasta un 15% de material de biosólido sustituyente.

²⁰ William R. MOZO-MORENO, (2014). *BIOSÓLIDOS DE PTAR COMO MATERIA PRIMA PARA LA FABRICACIÓN DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN COMO LOS LADRILLOS*. Universidad Santo Tomas Tunja, Docente.

3. MARCO LEGAL.

3.1 DECRETO 1287 DE 2014 – CRITERIOS PARA EL USO DE LOS BIOSÓLIDOS GENERADOS EN PLANTAS DE TRATAMIENTOS DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES.

Producto resultante de la estabilización de la fracción orgánica de los lodos generados en el tratamiento de aguas residuales municipales, con características físicas, químicas y microbiológicas que permiten su uso.

No son biosólidos las escorias y cenizas producto de la oxidación o reducción térmica de lodos, así como los residuos que se retiran de los equipos e instalaciones de la fase preliminar del tratamiento de aguas residuales, ni los provenientes de dragados o de limpieza de sumideros.²¹

El biosólido, posee características físicas, químicas y microbiológicas que deben ser evaluadas para determinar su campo de aplicación o su disposición final.

3.2 Alternativas de uso de los biosólidos.

De acuerdo con la categoría y clasificación, los biosólidos pueden destinarse para los siguientes usos:

Categoría A.

- a.** En zonas verdes tales como cementerios, separadores viales, campos de golf y lotes vacíos.
- b.** Como producto para uso en áreas privadas tales como jardines, antejardines, patios, plantas ornamentales y arborización.
- c.** En agricultura.

Categoría B.

- a.** En agricultura.
- b.** En plantaciones forestales.
- c.** En la recuperación, restauración o mejoramiento de suelos degradados.

²¹ Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2014). *DECRETO 1287 DE 2014 – CRITERIOS PARA EL USO DE LOS BIOSÓLIDOS GENERADOS EN PLANTAS DE TRATAMIENTOS DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES*. Ley 142 de 1994. 1-20

- d.** Como insumo en procesos de elaboración de abonos o fertilizantes orgánicos o productos acondicionadores para suelos, que modifiquen su calidad original.
- e.** Para remediación de suelos contaminados, lechos biológicos para el tratamiento de emisiones y vertimientos.
- f.** Como insumo en la fabricación de materiales de construcción.
- g.** En la estabilización de taludes de proyectos de la red vial nacional, red vial secundaria o terciaria.
- h.** En la operación de rellenos sanitarios tomo: cobertura diaria, cobertura final de cierre y de clausura de plataformas y en actividades de revegetalización y paisajismo.
- i.** Actividades de revegetalización y paisajismo de escombreras.

3.3 Inaplicación de los biosólidos en el suelo.

No se aplicaran biosólidos:

- a.** En Playas, páramos y cuerpos de agua.
- b.** En suelos saturados como vegas.
- c.** En suelos cuyo nivel freático máximo se encuentre a menos de un (1) metro de profundidad con respecto a la superficie del terreno.
- d.** En zonas aledañas a fuentes de captación subterráneas de agua para consumo humano o animal, en un radio inferior de cien (100) metros.
- f.** Suelos con alto riesgo de inundación.
- g.** Clase B, a menos de trescientos (300) metros de distancia de áreas residenciales urbanas, hospitales, locales de expendio de alimentos, escuelas, y parques.
- h.** En suelo rural a menos de 100 metros de viviendas aisladas.
- j.** En suelos donde se encuentren especies de fauna y flora amenazados para la aplicación de biosólidos de categoría B.

3.4 Disposición final de biosólidos.

Los biosólidos que no sean objeto de uso deberán ser dispuestos cumpliendo con la normatividad vigente. En caso de disposición final en rellenos sanitarios los operadores recibirán los biosólidos. Estos deberán cumplir con las condiciones para su manipulación y su disposición final.²²

²² Decreto 1287. (10 de Julio de 2014). *CRITERIOS PARA EL USO DE LOS BIOSÓLIDOS GENERADOS EN PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES*. Ministerio de vivienda, ciudad y territorio. wsp.presidencia.gov.co

4. MARCO TEÓRICO

4.1 AGUA RESIDUAL.

Definición: Desecho líquido provenientes de residencias, edificios, instituciones, fábricas o industrias.²³

4.2 AGUAS NEGRAS.

Aguas negras son fundamentalmente las aguas de abastecimiento de una población, después de haber sido impurificadas por diversos usos. Desde el punto de vista de su origen, resultan de la combinación de los líquidos o desechos arrastrados por el agua, procedentes de las casas habitación, edificios comerciales e instituciones, junto con los provenientes de los establecimientos industriales, y las aguas subterráneas, superficiales o de precipitación que pueden agregarse.²⁴

4.3 DEFINICIONES.

4.3.1 Aguas negras domésticas. son las que contienen desechos humanos, animales y caseros. También se incluye la infiltración de aguas subterráneas. Estas aguas negras son típicas de las zonas residenciales e las que no se efectúan operaciones industriales, o solo en muy corta escala.

4.3.2 Aguas pluviales. Formadas por todo el escurrimiento superficial de las lluvias, que fluyen desde los techos, pavimentos y otras superficies naturales del terreno.

4.3.3 Aguas negras combinadas. Son una mezcla de las aguas negras domesticas o sanitarias y de las aguas pluviales, cuando se colectan en las mismas alcantarillas.

²³ REGLAMENTO TÉCNICO DEL SECTOR DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO BÁSICO (RAS), T. D. (2000). *TITULO D. SISTEMAS DE RECOLECCIÓN Y EVACUACIÓN DE AGUAS RESIDUALES DOMESTICAS Y PLUVIALES*. Bogotá, D.C.: MinDesarrollo.

²⁴ Departamento de sanidad de Estados Unidos. (1995). *MANUAL DE TRATAMIENTO DE AGUAS NEGRAS*, P.15 – 17. LIMUSA – Noriega Editores.

4.3.4 Desechos industriales. Son las aguas de desecho provenientes de los procesos industriales. Pueden colectarse y disponerse aisladamente o pueden agregarse y formar parte de las aguas negras sanitarias o combinadas.²⁵

4.4 TRATAMIENTO DE AGUAS

Es un proceso por el cual los sólidos que el líquido contiene son separados parcialmente, haciendo que el resto de los sólidos orgánicos complejos muy putrescibles queden convertidos en sólidos minerales o en sólidos orgánicos relativamente estables. La magnitud de este cambio depende del proceso de tratamiento empleado. Una vez completado todo proceso de tratamiento es aun necesario disponer de los líquidos y los sólidos que se haya separado.²⁶

El tratamiento a las aguas residuales consiste en una combinación de procesos físicos, químicos y biológicos para degradar desechos orgánicos y nitrogenados y destruir o inactivar un gran número de agentes patógenos. Por lo general, el cloro (Cl₂) o compuestos clorados, ozono (O₃), o la luz ultra violeta (UV) se utilizan para desinfectar el efluente tratado antes de su vertido a las aguas receptoras.

El grado en que se realice el tratamiento depende fundamentalmente de los límites permitidos por las normas; dependiendo de los niveles de carga contaminante aprobada se deben realizar tratamientos primarios, secundarios y terciarios. En el tratamiento primario se realiza la eliminación de materiales flotantes y sólidos en suspensión; generalmente es un proceso preliminar al tratamiento secundario, proceso en el cual el agua tratada proveniente del tratamiento primario es sometida a una serie de tratamientos biológicos. Dependiendo de la exigencia de las normas se debe realizar un tratamiento terciario cuyo objetivo fundamental es la eliminación de contaminantes que no se eliminan con los tratamientos biológicos convencionales.²⁷

En la Planta de tratamiento de aguas residuales PTAR, El Salitre, se contempla el siguiente tratamiento.²⁸

Captación. El agua residual llega a través del sistema de alcantarillado sanitario a la Planta. Este sistema de alcantarillado, está diseñado buscando la separación de las aguas residuales y las aguas lluvias. Al separarlas se procura evitar que el

²⁵ Departamento de sanidad de Estados Unidos. (1995). *MANUAL DE TRATAMIENTO DE AGUAS NEGRAS*, P.15 – 17. LIMUSA – Noriega Editores.

²⁶ Departamento de sanidad de Estados Unidos. (1995). *MANUAL DE TRATAMIENTO DE AGUAS NEGRAS*, P.31– 40. LIMUSA – Noriega Editores.

²⁷ Ramalho, R. (1983). *TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUALES*. Bogotá: Editorial Reverté, S.A.

²⁸ Tratamiento de aguas y lodos PTAR Salitre. (s.f.). *ACUEDUCTO AGUA Y ALCANTARILLADO DE BOGOTÁ*. Recuperado el 26 de Diciembre de 2014, de <http://www.acueducto.com.co>

agua lluvia se eche a perder tanto como el agua residual. Las aguas lluvias se conducen a través de un sistema de canales abiertos hasta los humedales y los ríos directamente. La separación también facilita el tratamiento pues entre menos diluida llegue el agua residual a la planta, es más fácil remover los residuos contaminantes.

Cuando el agua residual se combina con grandes cantidades de agua lluvia, los residuos se diluyen complicando así su proceso de limpieza. Para ingresar el agua a la planta se utilizan cinco unidades de bombeo llamadas tornillos de Arquímedes o bombas de tornillo. Continuamente estos toman 4m³ por segundo de agua y la ingresan para su tratamiento.²⁹

Tratamiento preliminar. Este tratamiento sirve para proteger el equipo de bombeo y hacer más fáciles los procesos subsecuentes del tratamiento. Los dispositivos para el tratamiento preliminar están destinados a eliminar o separar los sólidos mayores o flotantes, a eliminar los sólidos inorgánicos pesados y eliminar cantidades excesivas de aceites o grasas.

Tratamiento primario. En este tratamiento se separan o se eliminan la mayoría de los sólidos suspendidos en las aguas negras, o sea aproximadamente de 40 a 60%, mediante el proceso físico de asentamiento en tanques de sedimentación. Cuando se agregan ciertos productos químicos en los tanques primarios, se eliminan casi todos los sólidos coloidales, así como los sedimentables, o sea un total de 80 o 90% de los sólidos suspendidos. Los dispositivos del tratamiento primario, tienen como propósito disipar la velocidad de las aguas negras, con el fin de que estas puedan sedimentar los sólidos.

Tratamiento Secundario. Este tratamiento debe hacerse cuando las aguas negras todavía contienen, después del tratamiento primario, más sólidos orgánicos en suspensión o solución que los que puedan ser asimilados por las aguas receptoras si oponerse a su uso normal adecuado. Este tratamiento depende principalmente de los organismos aerobios, para la descomposición de los sólidos orgánicos hasta transformarlos en sólidos inorgánicos o en sólidos orgánicos estables.

Tratamiento de lodos. El lodo primario resultante pasa a los tanques espesadores, donde se le retira el agua de exceso, produciendo lodo espesado. El lodo espesado pasa a los tanques digestores en los cuales a 35 °C, se acelera el proceso de descomposición del mismo por medio de bacterias anaerobias que degradan la materia orgánica. Aquí se produce lodo digerido. El lodo digerido es secado y de esta manera convertido en abono orgánico que es usado en la

²⁹ Tratamiento de aguas y lodos PTAR Salitre. (s.f.). ACUEDUCTO AGUA Y ALCANTARILLADO DE BOGOTÁ. Recuperado el 26 de Diciembre de 2014, de <http://www.acueducto.com.co>

recuperación de suelos degradados. El nombre técnico de este material es biosólido.

Deshidratación de lodos. Por medio de filtros de banda los lodos digeridos son procesados a fin de reducir su volumen y facilitar su transporte y disposición.

En cinco unidades, en las que tiene lugar filtración y presión entre telas, se realiza la separación sólido líquido del lodo hasta lograr un material de consistencia semisólida (torta de lodos) con una concentración de sólidos de aproximadamente 30%. Diariamente se producen 165 toneladas de biosólido con una humedad promedio de 70%. La dosificación media de polímero catiónico empleada en esta operación ha sido de 4,78 kg de polímero por tonelada de material seco.

Producción de biogás. Durante el proceso de digestión se produce biogás que es rico en metano. Alrededor del 30% es usado para calentar los lodos en el proceso de digestión. El biogás restante es quemado en una chimenea llamada tea.³⁰

4.5 BIOSÓLIDO.

Producto resultante de la estabilización de la fracción orgánica de los lodos generados en el tratamiento de aguas residuales municipales, con características físicas, químicas y microbiológicas que permiten su uso.³¹

Los términos biosólidos y lodos de depuradora se usan indistintamente.

Cuando se trata adecuadamente y procesados, los lodos de depuración se convierte en biosólidos; los materiales orgánicos ricos en nutrientes procedentes del tratamiento de aguas residuales domésticas en una planta de tratamiento de aguas residuales. Los biosólidos pueden ser reciclados y aplicados como fertilizantes para mejorar y mantener suelos productivos y estimular el crecimiento de las plantas.

Los lodos de depuradora, utilizados en el contexto de la normativa, como la EPA ha establecido un marco regulatorio de protección para gestionar el uso y eliminación de los lodos de depuradora. Opciones eficaces de lodos de aguas residuales y la gestión de biosólidos ayudan a garantizar que los materiales útiles

³⁰ Tratamiento de aguas y lodos PTAR Salitre. (s.f.). *ACUEDUCTO AGUA Y ALCANTARILLADO DE BOGOTÁ*. Recuperado el 26 de Diciembre de 2014, de www.acueducto.com.co

³¹. Decreto 1287. (10 de Julio de 2014). *CRITERIOS PARA EL USO DE LOS BIOSÓLIDOS GENERADOS EN PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES*. Ministerio de vivienda, ciudad y territorio. wsp.presidencia.gov.co

son reciclados en la tierra y perjudiciales materiales no son liberados a los cuerpos de agua.³²

Son considerados residuos asimilables a urbanos y, aunque no pueden clasificarse como tóxicos ni peligrosos, si poseen contaminantes que obligan a su tratamiento.

El término contaminante (Environmental Protection Agency) –EPA- (Federal Register. 40 CFR Part 503)2 , en su legislación sobre utilización de lodos, es definido como un organismo patógeno o como una sustancia orgánica o inorgánica o la combinación de ambas, que al tener contacto con un organismo por vía dérmica, ingestión o inhalación, directamente del medio ambiente o a través de la cadena alimenticia, pueda causar la muerte, inducir cáncer, producir enfermedades, alteración del comportamiento, mutaciones genéticas, malformaciones fisiológicas y/o físicas.³³

4.5.1 Clasificación de los biosólidos.

Biosólido Clase A. Suelen llamarse de calidad excepcional. Presentan una densidad de coliformes fecales inferior a 1000 NMP por gramo de sólidos totales o la densidad de Salmonella. Es inferior a 3 NMP por 4 gramos de sólidos totales.

La densidad de virus entéricos debe ser menor o igual a 1 UFC por 4 gramos de sólidos totales y los huevos viables de helmintos inferiores a 1 por 4 gramos de sólidos totales. Un biosólido con estos niveles que además tenga tratamiento para reducir vectores, no tendrá restricciones en su aplicación agraria y sólo será necesario solicitar permisos para garantizar que estas normas hayan sido cumplidas.

Biosólido Clase B. Con una densidad de coliformes fecales inferior a 2×10^6 NMP por gramo de sólidos totales o 2×10^6 UFC por gramo de sólidos totales.

Este tipo de biosólidos deberá recibir tratamiento y será el que mayores restricciones presente para uso agrícola. Además, la citada regla que rige el uso y eliminación de biosólidos establece límites cuantitativos relativos al contenido de metales presentes en ellos, normas de reducción de agentes patógenos, restricciones a los sitios de aplicación, condicionantes y supervisión de recolección de cultivos tratados, mantenimiento de registros y requerimientos de presentación

³² Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos - EPA. (2016). BIOSÓLIDOS. Última actualización 28 de Enero. www.epa.gov

³³ Juan Alberto Vélez Zuluaga. (2007). LOS BIOSÓLIDOS: ¿UNA SOLUCIÓN O UN PROBLEMA? P+L. P 58-59. www.lasallista.edu.co

de informes sobre biosólidos aplicados a la tierra, así como disposiciones similares para los que se desechan en rellenos sanitarios.

Los biosólidos que se incineran tienen que satisfacer las normas relativas al contenido de metales y las disposiciones sobre emisiones que liberan al medio ambiente, incluidas las disposiciones de la Leyes de Aire Limpio.

4.5.2 Aprovechamiento del biosólido PTAR el Salitre. ³⁴

La deshidratación de los lodos digeridos permite una producción media mensual de biosólido en la PTAR Salitre de cuatro mil 500 toneladas al mes. Contiene un alto porcentaje de nitratos y fosfatos. Al provenir de la cuenca del río Salitre (principalmente doméstica) no excede el nivel de peligrosidad de concentración de metales pesados según la norma de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, por lo que es potencialmente apto como fertilizante orgánico para agricultura y como enmienda de suelos luego de un tratamiento básico que lo transforme en biosólido “tipo A”.

En la actualidad el biosólido obtenido en la PTAR Salitre es clasificado como “tipo B”, que lo hace apto directamente para usos de reforestación, pero no para agricultura de consumo. El motivo por el cual debemos atenernos a la normatividad norteamericana para caracterizar nuestro biosólido es que actualmente en Colombia no existe legislación al respecto.

4.5.3 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. ³⁵

³⁴ Tratamiento de aguas y lodos PTAR Salitre. (s.f.). Acueducto agua y alcantarillado de Bogotá. Recuperado el 26 de Diciembre de 2014, de <http://www.acueducto.com.co>

³⁵ Juan Alberto Vélez Zuluaga. (2007). *LOS BIOSÓLIDOS: ¿UNA SOLUCIÓN O UN PROBLEMA? P+L*. P 60 - 61. www.lasallista.edu.co

5. MATERIAS PRIMAS.

5.1 Cemento.

5.1.1 Historia. Historia. Los cementos calizos han sido utilizados, por el hombre desde la antigüedad; el yeso fue utilizado por los egipcios, la cal con ciertos materiales de origen volcánico, o arcillas, cuando requerían construir obras sumergidas o sometidas a la acción del agua; desde aquella época se conoce el cemento Pozzolánico, porque los romanos usaban cenizas volcánicas del pueblo de Pozzuoli, cerca del Vesubio.

En 1756 Jhon Smeaton utiliza un mortero, mezcla de puzolana y caliza con arcilla en gran proporción, para reparar el faro de Eddyston (Inglaterra), iniciando así la era del cemento. En el año 1824 Joseph Aspdin patenta el “Cemento Portland”, el cual se obtiene al calentar una mezcla de arcilla y caliza hasta eliminar el CO₂.

El nombre de Portland se le dio por la semejanza en color y calidad entre el cemento fraguado y la piedra de portland (Caliza del sur de Inglaterra).

Las investigaciones sobre este producto, mezcla de calizas y arcillas, continuaron y en el año 1845 el inglés Issac Johnson da a la mezcla la temperatura adecuada para formar el Clinker, producto que después de molido ofrece óptima calidad como cementante, el actualmente utilizado.

En Colombia se inicia la producción del cemento en el año 1909, por la fábrica Cementos Samper en Bogotá.

5.1.2 Definición.

- ✚ **Cemento.** Material capaz de aglomerar o unir partículas sólidas por poseer propiedades adherentes y cohesivas. ³⁶
- ✚ El cemento es un polvo fino que se obtiene de la calcinación a 1,450°C de una mezcla de piedra caliza, arcilla y mineral de hierro. El producto del proceso de calcinación es el Clinker —principal ingrediente del cemento— que se muele finamente con yeso y otros aditivos químicos para producir cemento. ³⁷

³⁶ Materiales estructurales en las construcciones civiles. (1989). *CEMENTO PORTLAND*. Fernández González, Rosalba.

³⁷ Productos y servicios. (2016). CEMEX – *CEMENTO*. www.cemex.com

- ✚ **Cemento Portland.** Cemento resultante del calentamiento, hasta la temperatura de semifusión, de una mezcla proporcionada de calizas y arcillas, esta mezcla se pulveriza, adicionándole yeso para controlar el tiempo de fraguado.
- ✚ **Clinker.** Es el producto de semifusión de arcillas y calizas, antes de molienda.
- ✚ **Hidratación.** Es la etapa en la cual los compuestos del cemento portland se hidratan al entrar en contacto con el agua.
- ✚ **Fraguado.** Es el paso del cemento hidratado del estado fluido, al estado sólido o rígido.
- ✚ **Curado.** Etapa durante la cual se incrementa la dureza y la resistencia del cemento hidratado en forma apreciable.
- ✚ **Mortero.** Mezcla de cemento, agua y arena.
- ✚ **Concreto.** Mezcla de cemento, arena agregado grueso y agua.
- ✚ **Cementos hidráulicos.** Son aquellos que tienen la propiedad de fraguar y endurecer en presencia de agua; por ejemplo, el cemento portland, las puzolanas, las cales hidráulicas.

El cemento es el material de construcción más utilizado en el mundo. Aporta propiedades útiles y deseables, tales como resistencia a la compresión (el material de construcción con la mayor resistencia por costo unitario), durabilidad y estética para una diversidad de aplicaciones de construcción.³⁸

Algunas de las propiedades de los productos basados en cemento son:

- ✚ **Hidráulicas:** La reacción de la hidratación entre el cemento y el agua es única: el material fragua y luego se endurece. La naturaleza hidráulica de la reacción permite que el cemento hidratado se endurezca aún bajo el agua.
- ✚ **Estéticas:** Antes de fraguar y endurecerse, el cemento hidratado presenta un comportamiento plástico. Por lo tanto, se puede vaciar en moldes de diferentes formas y figuras para generar arquitecturas estéticamente interesantes, que serían difíciles de lograr con otros materiales de construcción.

³⁸ Materiales estructurales en las construcciones civiles. (1989). *CEMENTO PORTLAND*. Fernández González, Rosalba.

- ✚ **De durabilidad:** Cuando se usa correctamente (por ejemplo, con buenas prácticas de diseño de mezclas de concreto) el cemento puede formar estructuras con una vida de servicio larga que soporte los cambios climáticos extremos y agresiones de agentes químicos.
- ✚ **Acústicas:** Utilizados con un diseño adecuado, los materiales basados en cemento pueden servir para un excelente aislamiento acústico.

5.1.3 Clasificación de los cementos portland.

El conocimiento bastante extenso sobre el cemento en cuanto a composición, características y comportamiento permite fabricar cementos con propiedades específicas.

La clasificación en Colombia es la siguiente:

- ✚ **Cemento Portland Tipo 1.** Es el destinado a obras de hormigón en general, al que no se le exigen propiedades especiales.
- ✚ **Cemento Portland Tipo 1M.** Alcanza resistencias superiores a las del Tipo 1.
- ✚ **Cemento Portland Tipo 2.** Es resistente a la acción moderada de sulfatos, el desprendimiento de calor es menor que en los cementos normales.
- ✚ **Cemento Portland Tipo 3.** Alcanza alta resistencia inicial.
- ✚ **Cemento Portland Tipo 4.** El desprendimiento de calor es bajo.
- ✚ **Cemento Portland Tipo 5.** Ofrece alta resistencia a la acción de sulfatos.
- ✚ **Cemento Portland Blanco.** Se elabora con materias primas seleccionadas que no contienen óxido de hierro, por eso la coloración; se usa para decoración.³⁹

³⁹ Materiales estructurales en las construcciones civiles. (1989). *CEMENTO PORTLAND*. Fernández González, Rosalba.

5.1.4 Características y Aplicaciones .

CEMENTO NATURAL.

Las características de estos materiales aglomerantes son sus tiempos cortos de fraguado en los rápidos y en sus bajas resistencias lo que constituye el motivo principal de sus aplicaciones. Son utilizables para trabajos de albañilería, morteros de agarre, acabados de juntas, revocos, enlucidos, desagües, fosas, pavimentación y en hormigones de relleno a los que no se les exija resistencia de carga; no pueden ser empleados en hormigón estructural.

Su baja resistencia es indicada para la colocación de piezas de materiales cerámicos sin peligro de que estos se agrieten por la excesiva resistencia de un mortero de unión. No obstante, existen actualmente los cementos-cola, de empleo específico para estos casos. ⁴⁰

CEMENTO PORTLAND.

Las propiedades fundamentales de los cementos Portland son sus resistencias mecánicas (compresión, tracción, flexión). Pero hay otras propiedades que facilitan la conservación o aplicación de estos aglomerantes, como son la resistencia química (al agua de mar, selenitosa, a las aguas carbónicas), la velocidad de reacción con el agua (hidratación), que es previa a su aplicación, y el calor

En Colombia se producen tres tipos de cemento Portland:

-  Portland de escoria de alto horno.
-  Cemento Portland Pozzolánico.
-  Cemento Portland adicionado. ⁴¹

Los más comunes en Colombia son:

Tabla 1. Tipos de cemento portland en Colombia.

TIPO	DESCRIPCIÓN
PORTLAND TIPO I	Uso común.
PORTLAND TIPO II	Moderada resistencia a los sulfatos.
PORTLAND TIPO III	Alta resistencia.
PORTLAND TIPO IV	Bajo calor de hidratación.

⁴⁰ Gomá, F. (1979). *EL CEMENTO PORTLAND Y OTROS AGLOMERANTES*. (Editores Técnicos Asociados S.A., Ed.) Barcelona, España: Editorial Reverté. Recuperado el 01 de 10 de 2014

⁴¹ Instituto del Concreto – Asocreto. (2006). *DURABILIDAD Y PATOLOGÍA DEL CONCRETO*. Asocreto

TIPO	DESCRIPCIÓN
PORTLAND TIPO V	Alta resistencia a los sulfatos Cemento portland de escoria de alto horno Cemento portland Puzolánico. Cemento portland adicionado.

Fuente: (ASOCRETO , 2006)

5.2 AGREGADOS.

5.2.1 Definición.

✚ **AGREGADO FINO (Arena).** Material pétreo, que pasa el tamiz ICONTEC 4,76 mm (N° 4), es decir con granos de un tamaño menor a medio centímetro.

✚ **AGREGADO GRUESO (Granito).** Material pétreo, retenido en el tamiz 4,76 mm (N° 4), es decir con granos de un tamaño igual o mayor a medio centímetro.

5.2.2 Características y aplicaciones.

5.2.2.1 Agregado fino (Arena). Se podrá utilizar la misma arena que se usa comúnmente para elaborar el concreto. Deberá ser tan limpia y uniforme como se pueda y se almacenará de tal manera que se pueda manejar sin contaminarla. En lugares lluviosos o en épocas de invierno, la arena se deberá almacenar bajo techo o cubierta con telas impermeables o plásticos para que no se sature; una arena saturada puede tener más agua de la que necesita la mezcla. ⁴²

Está libre de arcilla, libre de partículas deleznable, libre de material que pasa el tamiz de 74 micras, libre de partículas livianas (Mica, Carbón, lignito). Libre de sulfatos, materia orgánica, si al hacer el ensayo colorimétrico de contenido de MATERIA ORGÁNICA resulta más oscuro que el color ámbar se rechaza. ⁴³

⁴² Instituto Colombiano de productores de cemento. (1986). *FABRICACIÓN DE ADOQUINES DE CONCRETO*. ICPC, 16.

⁴³ Instituto del Concreto – Asocreto. (2006). *AGREGADOS*. Asocreto.

Tabla 2. Criterio, color aceptación agregado fino.

COLOR	Nº DE REFERENCIA ORGÁNICA	CRITERIO DE ACEPTACIÓN
AMARILLO CLARO	1	ACEPTABLE
AMARILLO OSCURO	2	ACEPTABLE
ÁMBAR	3	ACEPTABLE
ÁMBAR OSCURO	4	NO
NEGRO	5	NO

Fuente: (ASOCRETO , 2006)

5.2.2.2 Agregado grueso (granito). El índice de aplanamiento y alargamiento debe ser <15%. Desgaste en la máquina de los ángeles <40%. En el caso de los adoquines, si el tamaño máximo es igual o menor que el recomendado será más fácil obtener superficies lisas, bien terminadas y el manejo de la mezcla también será más fácil; si por el contrario el tamaño máximo es mayor, se dificultara el manejo de la mezcla y aparecen irregularidades en el acabado de los adoquines. (Instituto Colombiano de productores de cemento, 1986).

Tabla 3. Granulometría típica agregados para concreto.

NORMA ICONTEC 32	DESIGNACIÓN ALTERNA	% QUE PASA (EN PESO)
12.70 mm	1/2"	100
9.51 mm	3/8"	100
4.76 mm	Nº 4	85
2.38 mm	Nº 8	65
1.19 mm	Nº 16	50
595 µ	Nº 30	35
297 µ	Nº 50	15
149 µ	Nº 100	5
74 µ	Nº 200	3

Fuente: (NORMA TECNICA COLOMBIANA 174, 2009)

5.3 AGUA.

5.3.1 Definición. El agua es el componente del concreto que entra en contacto con el cemento generando el proceso de hidratación, que desencadena una serie de reacciones que terminan entregando al material sus propiedades físicas y mecánicas, su buen uso se convierte en el parámetro principal de evaluación para establecer el eficiente desempeño del concreto en la aplicación.⁴⁴

5.3.2 Clasificación del agua en el concreto.

5.3.2.1 Agua de mezclado. Cantidad de agua que requiere el concreto por unidad de volumen para que se hidraten las partículas del cemento y para proporcionar las condiciones de manejabilidad adecuada que permitan la aplicación y el acabado del mismo en el lugar de la colocación en el estado fresco.

5.3.2.2 Agua de curado. Es la cantidad de agua adicional que requiere el concreto una vez endurecido a fin de que alcance los niveles de resistencia para los cuales fue diseñado. Este proceso adicional es muy importante en vista de que, una vez colocado, el concreto pierde agua por diversas situaciones como: altas temperaturas por estar expuesto al sol o por el calor reinante en los alrededores, alta absorción donde se encuentra colocado el concreto, fuertes vientos que incrementan la velocidad de evaporación. Aunque en la actualidad existen productos que minimizan la pérdida superficial del agua, en el caso de que no sean utilizados se requiere adicionársela periódicamente a los elementos contruidos para que alcancen el desempeño deseado.

5.4 ADOQUÍN DE CONCRETO.

5.4.1 Definición. Elemento macizo de concreto, prefabricado, con una forma de prisma recto, cuyas bases son polígonos que en conjunto, permiten conformar una superficie que se utiliza como capa de rodadura para peatonal o vehicular.⁴⁵

Elemento no aligerado en su masa, de concreto, prefabricado, con forma de prisma recto, cuyas bases son polígonos tales que en conjunto permiten

⁴⁴ Osorio, J. D. (2010). *HIDRATACIÓN DEL CONCRETO: AGUA DE CURADO Y AGUA DE MEZCLADO*. 360 ° EN CONCRETO, 1-3.

⁴⁵ Norma Técnica Colombiana - NTC 6008. (2013). *TERMINOLOGÍA Y CLASIFICACIÓN PARA ADOQUINES Y LOSETAS DE CONCRETO*. Bogotá D.C., Colombia: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). Ed. 17 de Julio.

conformar una superficie que se utiliza como capa de rodadura en los pavimentos y en algunos casos, en los pisos recubiertos con adoquines de concreto. ⁴⁶

5.5 Partes de un Adoquín.

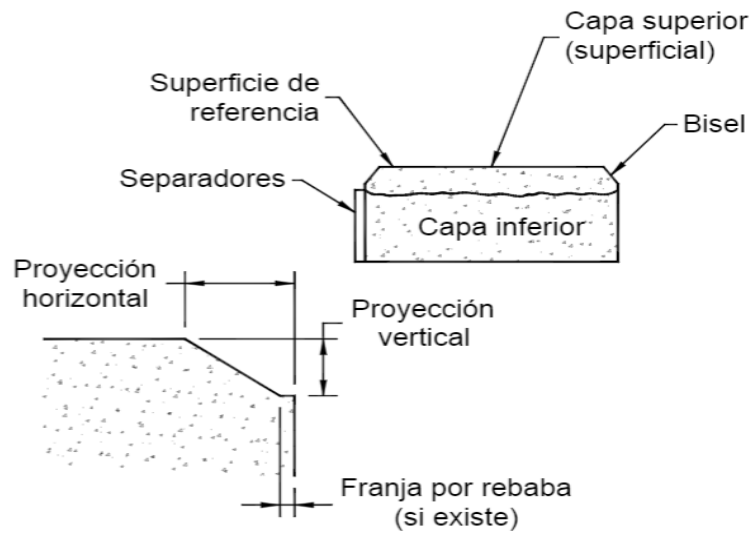
Tabla 4. Partes de un adoquín.

CARA DE DESGASTE.	Cara superior del adoquín la cual queda a la vista en el pavimento y soporta directamente el tránsito (<i>Ver figura 2</i>).
CAPA SUPERIOR, CAPA SUPERFICIAL.	Capa que conforma la cara de desgaste en los adoquines bicapa (<i>Ver figura 1</i>).
CARA INFERIOR.	Capa debajo de la capa superficial de los adoquines bicapa que constituye la mayoría de la masa de los mismos (<i>Ver figura 1</i>).
CARA DE APOYO.	Capa inferior del adoquín que queda en contacto con la capa de arena que los soporta (<i>Ver figura 2</i>).
PARED, CARA LATERAL.	Cada una de las caras laterales y verticales del adoquín que están en contacto con otros adoquines vecinos a través de la junta que conforman entre ellos (<i>Ver figura 2</i>).
ARISTA.	Línea de intersección entre dos planos o caras. Por lo general se hace referencia a la que conforma la cara de desgaste y las paredes (<i>Ver figura 2</i>).
BISEL.	En los adoquines biselados o parcialmente biselados es el perfil inclinado (generalmente un plano a 45°) que, reemplaza la arista que conforma la cara de desgaste y las paredes (<i>Ver figura 1</i>).
SUPERFICIE DE REFERENCIA.	En los adoquines no biselados, es la superficie que corresponde a la cara de desgaste; y en los biselados, corresponde a la cara de desgaste sin tomar en cuenta el volumen del prisma sustraído por la presencia del bisel (<i>Ver figura 1</i>).
PROYECCIÓN HORIZONTAL DEL BISEL.	Es la proyección del perfil del bisel sobre la superficie de referencia (prolongación de la cara de desgaste) del adoquín, incluyendo la franja por rebaba, si existe (<i>Ver figura 1</i>).
PROYECCIÓN VERTICAL DEL BISEL.	Es la proyección del perfil del bisel sobre la pared del adoquín (<i>Ver figura 1</i>).
SEPARADORES.	Cada una de las salientes verticales generadas sobre las paredes de los adoquines para garantizar una separación adecuada y uniforme entre adoquines contiguos (<i>Ver figura 2</i>).

Fuente: Autor

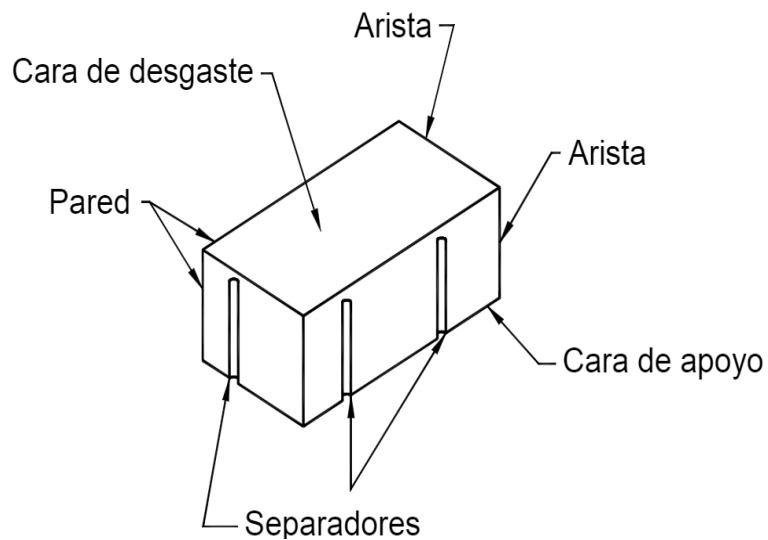
⁴⁶ Norma Técnica Colombiana - NTC 2017. (2004). *ADOQUINES DE CONCRETO PARA PAVIMENTOS*. Bogotá D.C., Colombia: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). Ed. 03 DE Abril.

Figura 1. Partes de un adoquín (corte).



Fuente: (NORMA TECNICA COLOMBIANA 2017, 2004)

Figura 2. Partes de un adoquín.



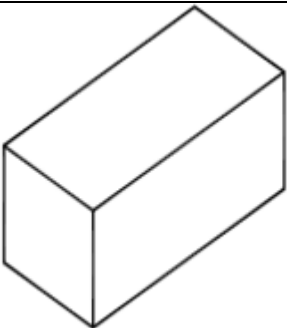
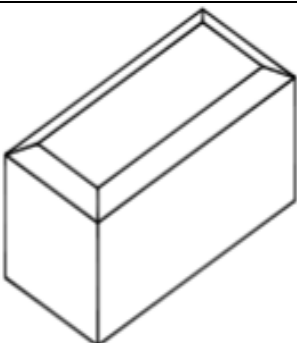
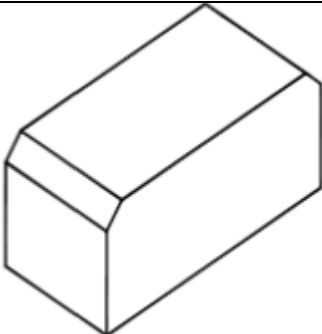
Fuente: (NORMA TECNICA COLOMBIANA 2017, 2004)

5.6 CLASIFICACIÓN.

Tabla 5. Clasificación de los adoquines.

SEGÚN LA GEOMETRÍA GENERAL.	
ADOQUÍN ESTÁNDAR.	Es el adoquín que en conjunto conforma una superficie continua, a excepción de la junta estándar. Por lo general, se denomina simplemente como adoquín (<i>Ver figura 3</i>).
SEGÚN SUS ARISTAS.	
ADOQUÍN BISELADO.	Es el adoquín en el cual la cara de desgaste está limitada por un bisel en todas sus aristas (<i>Ver figura 4</i>).
ADOQUÍN PARCIALMENTE BISELADO.	Es el adoquín en el cual la cara de desgaste está limitada por un bisel en algunas de sus aristas (<i>Ver figura 5</i>).
ADOQUÍN NO BISELADO, PRISMÁTICO.	Es el adoquín sin bisel ni otra modificación en las aristas de la cara de desgaste (<i>Ver figura 3</i>).

Fuente: Autor

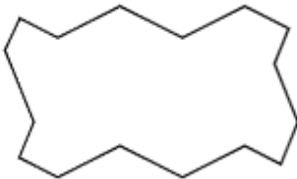
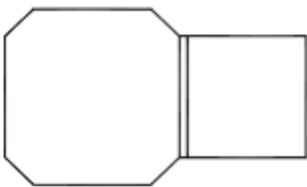
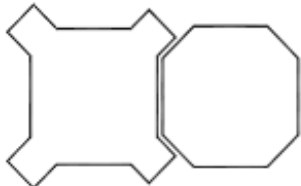
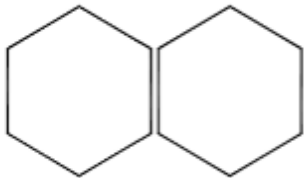
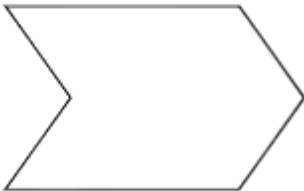
Figura 3. Adoquín no biselado.	Figura 4. Adoquín biselado.	Figura 5. Adoquín parcialmente biselado.
		

Fuente: (NORMA TECNICA COLOMBIANA 2017, 2004)

5.6.1 Debido a la forma.

Adoquín Tipo 1, adoquín rectangular: Es el adoquín con una forma única, básicamente rectangular, que se puede colocar siguiendo diversos patrones de colocación como espina de pescado, hileras, tejido de canasto, etc.

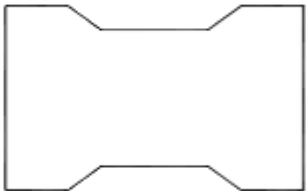
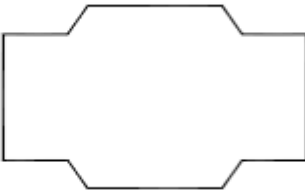
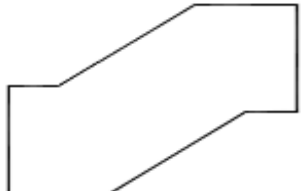
Figura 6. Clases de Adoquín Tipo 1.

ADOQUÍN RECTO	ADOQUÍN ANGULADO
	
ADOQUÍN ONDULADO	ADOQUÍN UNI - UNDECOR
	
ADOQUÍN SÚPER - DECOR	ADOQUÍN DOBLE HEXÁGONO
	
ADOQUIN TIPO V	

Fuente: (NORMA TECNICA COLOMBIANA 2017, 2004)

Adoquín Tipo 2, adoquín no rectangular: Es el adoquín con forma única, diferente a la rectangular, que sólo se puede colocar siguiendo un sólo patrón de colocación en hiladas. Algunas de las variantes de forma del adoquín Tipo 2. Se observan a continuación en la *figura 7*.

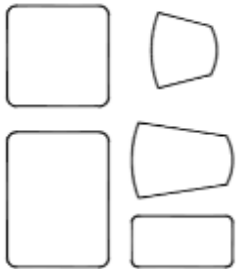
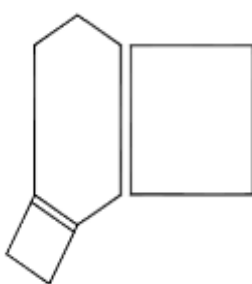
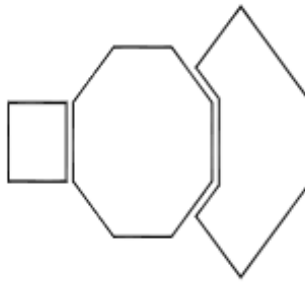
Figura 7. Clases de Adoquín Tipo 2.

ADOQUÍN HUESO DE PERRO O “I”	ADOQUÍN “CRUZ”
	
ADOQUÍN "VOLLVERBUND"	ADOQUÍN “TRÉBOL”
	

Fuente: (NORMA TECNICA COLOMBIANA 2017, 2004)

Adoquín Tipo 3, sistema de adoquines: Son los adoquines de dos o más formas que conforman una superficie completa siguiendo uno o varios patrones de colocación. Algunas de las variantes de forma del adoquín Tipo 3 son los sistemas:

Figura 8. Clases de Adoquín Tipo 3.

ADOQUÍN CLÁSICO	ADOQUÍN SIMETRÍA	ADOQUÍN FIGURA
		

Fuente: (NORMA TECNICA COLOMBIANA 2017, 2004)

5.6.2 Dimensiones del adoquín.

- ✚ **Longitud:** La longitud nominal de los adoquines no debe ser menor de 50 mm ni mayor de 250 mm.
- ✚ **Ancho:** El ancho nominal de los adoquines no debe ser menor de 50 mm.
- ✚ **Espesor:** El espesor estándar de los adoquines no debe ser menor de 60 mm.
- ✚ **Junta estándar:** El ancho de la junta estándar debe ser de 2 mm.
- ✚ **Bisel:** El bisel debe tener igual forma o perfil en toda su longitud de mínimo 3 mm y máximo 7 mm.

5.7 PAVIMENTOS DE ADOQUÍN.

Los pavimentos son estructuras compuestas por capas de diferentes materiales, que se construyen sobre el terreno natural, para que personas, animales o vehículos puedan transitar sobre ellos, en cualquier época del año, de manera segura, cómoda y económica.

Los materiales de las capas se escogen según su costo y disponibilidad, y mientras más superficiales estén, mejores (más resistentes) deberán ser. A la capa de la superficie se le denomina *capa de rodadura* y es la que está en contacto directo con el tránsito. A las capas inferiores se les llama *base* (cuando se tiene sólo una) o *base y subbase* (cuando se tienen dos). Al terreno natural o suelo se le conoce como *subrasante* y es el encargado de soportar el pavimento.

5.7.1 Pavimentos de Adoquines de concreto. Su capa de rodadura está conformada por los adoquines de concreto, colocados sobre una capa de arena y con un sello de arena entre sus juntas. De la misma manera que los pavimentos de asfalto, pueden tener una base, o una base con una sub-base, que pueden tener espesores ligeramente menores que para los de asfalto. También se consideran como pavimentos *flexibles* y son del color gris claro del concreto. ⁴⁷

Pavimento cuya capa de rodadura está conformada por adoquines de concreto colocados sobre una capa de arena y un sello de arena en las juntas entre adoquines. Esta capa de rodadura va colocada sobre la estructura de base (base

⁴⁷ Instituto Colombiano de Productores de Concreto. Guillermo Madrid. *CONSTRUCCIÓN DE PAVIMENTOS DE CONCRETO*. http://www.construdata.com/BancoConocimiento/C/cartilla_de_adoquines.

o base y subbase) de espesores y materiales adecuados (definidos por el diseñador estructural del pavimento), que junto con la capa de rodadura le dan la capacidad estructural al pavimento de adoquines de concreto, el cual se comporta como un pavimento flexible. ⁴⁸

Los pavimentos de adoquines de concreto son una vieja idea (los pavimentos de piedra), traída al presente, pero con un nuevo material (el concreto); con inmensas ventajas sobre los de piedra o los de arcilla cocida.

5.7.2 Ventajas de los Pavimentos de adoquín.

Las ventajas de estos pavimentos se basan en que su capa de rodadura está hecha con adoquines de concreto; es decir, piezas prefabricadas, que se pueden producir tanto en equipos sencillos y pequeños como en tecnificados y grandes; por parte de productores comerciales, grupos comunitarios o administraciones municipales; sin importar la escala y la localización de los proyectos. Para su construcción se utiliza poca maquinaria (básicamente una placa vibrocompactadora ("ranita") y mucha mano de obra local.

Como los adoquines no van pegados sino unidos por compactación, y como deben durar unos 40 años, al reparar el pavimento se pueden reutilizar, por lo cual son muy económicos para poblaciones o barrios sin redes de servicios completas o en mal estado. Todos los materiales para este pavimento llegan a la obra listos para ser utilizados, por lo cual se puede construir y dar al servicio en un mismo día. Esto permite desarrollar un programa de pavimentación por etapas, a medida que se va disponiendo de recursos.

Al pavimento de adoquines se le coloca una base que se diseña para que resista cualquier tipo de tránsito, desde el peatonal hasta el de camiones. Adicionalmente, como los adoquines se producen en máquina, con moldes, se les pueden dar distintas formas; y también colores, para que sean decorativos. Por esto, el pavimento de adoquines se utiliza desde zonas para tránsito peatonal (andenes, plazas, patios para juegos, instalaciones deportivas, etc.) hasta las de tránsito pesado (calles, carreteras, terminales de transporte, carga y puertos, pistas para aeropuertos) e inclusive para fines decorativos. ⁴⁹

⁴⁸ Norma Técnica Colombiana - NTC 2017. (2004). *ADOQUINES DE CONCRETO PARA PAVIMENTOS*. Bogotá D.C., Colombia: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). Ed. 03 DE Abril.

⁴⁹ Instituto Colombiano de Productores de Concreto. Guillermo Madrid. *CCONSTRUCCIÓN DE PAVIMENTOS DE CONCRETO*. http://www.construdata.com/BancoConocimiento/C/cartilla_de_adoquines

6. MATERIAS PRIMAS.

6.1 Materiales

Esta investigación utiliza cemento Holcim Tipo 1, el agregado fino es suministrado por la cantera (Proveedora Héctor Reyes), ubicada en la ciudad de Sogamoso, el granito por la empresa (central de triturados), de la ciudad de Duitama, el agua es obtenida en la fábrica PREFABRICADOS DEL SOL LTDA., gracias a la empresa Coservicios SA. ESP. de la ciudad de Sogamoso. En el laboratorio de la universidad Santo Tomas, se trabaja con agua suministrada por la empresa Proactiva aguas de Tunja S.A. El biosólido es suministrado por la planta de tratamiento de aguas residuales “El Salitre” de la ciudad de Bogotá. Finalmente el biosólido es incinerado en un horno a gas natural ubicado en el municipio de Ráquira. A partir de la quema del Biosólido; se obtendrá un material resultante de ceniza estéril, con la cual se realizará porcentualmente la dosificación para hacer los especímenes de adoquín, teniendo en cuenta los parámetros exigidos por la norma NTC 174 – referente a concretos (especificaciones de los agregados para concreto); y la norma NTC 2017 (Segunda actualización) - adoquines de concreto para pavimentos.

Se fabrica un total de 180 piezas de adoquín de concreto empleando los materiales anteriores, con los cuales se desea cumplir con las especificaciones de la norma técnica colombiana NTC 2017. Previamente a dichos parámetros, se emplean materiales como aceite, moldes, recipientes, brochas, y pintura proporcionados por la fábrica PREFABRICADOS DEL SOL LTDA.

6.1.1 Relación de herramientas

En el desarrollo de esta investigación, se implementaran herramientas esenciales como:

- ✚ Tamices, se dispondrá de una serie de estos, para las pruebas de granulometría.
- ✚ Máquina de los ángeles para hacer el desgaste de las cenizas.
- ✚ Balanza, con un margen de error de 0,1 %.
- ✚ Picnómetro, para los ensayos de densidad (gravedad específica), absorción de agua del agregado fino (arena), y equivalente de arena.

- ✚ Herramientas pequeñas como platones, recipientes, baldes, palas, brochas, martillo, pisón, moldes, etc.
- ✚ Bolsas plásticas de polietileno, para transportar las muestras de biosólido.
- ✚ Horno con suficiente tamaño, capaz de soportar temperatura uniforme de 110 °C.
- ✚ Esferas de acero inoxidable magnéticas de 9,5 mm de diámetro.
- ✚ Recipiente cilíndrico prueba de resistencia a la abrasión Micro-Deval.
- ✚ Máquina de ensayo de prueba de resistencia a la abrasión Micro-Deval.
- ✚ Horno para la incineración del biosólido.
- ✚ Lonas y pala para la recolección de las cenizas en los hornos.
- ✚ Máquina de ensayo de resistencia a la flexotracción, la maquina debe ser capaz de aplicar cargas de 20 KN.
- ✚ Piscina para las pruebas de absorción de agua.
- ✚ Herramientas Tecnológicas para el desarrollo de la investigación como Microsoft Office Excel, Microsoft Word, Google Chrome, bases de datos de la biblioteca virtual de la Universidad Santo Tomas y de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

6.2 Marco metodológico

6.2.1 Tiempo y Lugar

Esta investigación se realizó en un tiempo de 15 meses, iniciando en el mes de marzo del año 2015. El primer paso consistió en la búsqueda de información sobre estudios previos en el uso de biosólidos y cenizas de biosólidos; productos de plantas de tratamiento de agua residual en mezclas de concreto, mortero o en su efecto en bloques o adoquines del mismos material. Para esta actividad se hizo uso de las bases de datos de la biblioteca de la Universidad Santo Tomas, la biblioteca virtual de Google académico y la biblioteca virtual de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

Se realizó pruebas de laboratorio para los agregados empleados en la elaboración de la mezcla de concreto, todos con el fin de hallar la caracterización y calidad de estos, los diferentes ensayos se realizaron en el laboratorio de la facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Santo Tomas seccional Tunja. Las pruebas a flexotracción se dividen en tres etapas según el tiempo de curado de los especímenes (7, 14 y 28 días).

6.2.2 Métodos

Para el desarrollo de esta investigación se empleó diferentes métodos, como la investigación cuantitativa, (se hace uso de medir variables, en función de magnitud, extensión o cantidad determinada); la investigación experimental (Somete un objeto en estudio a la influencia de ciertas variables, en condiciones controladas y conocidas en el proceso, con el fin de observar que resultados produce la variable en el objeto), y la investigación descriptiva (Capaz de seleccionar las características fundamentales del objeto de estudio y su descripción detallada dentro del marco conceptual de referencia).

6.3 DISEÑO METODOLÓGICO.

6.3.1 Definición conceptual de variables.

✚ Variables independientes:

Porcentaje de cenizas de biosólido adicionadas a la mezcla. En esta investigación se utilizaron cenizas de biosólido, procedentes del subproducto biosólido de la PTAR “El salitre” de la ciudad de Bogotá, como materia prima. Niveles de la variable (0%, 5%, 10%, 15%, 20% y 25%).

✚ Variables dependientes:

Resistencia a la flexotracción: Se mide en MPa, y se realiza de acuerdo a la norma NTC 2017.

Absorción de agua: Se mide en porcentaje (%), medida de la cantidad de agua que absorbe el adoquín, se realiza de acuerdo a la NTC 2017.

Densidad: se mide en Kg/m^3 , se realiza de acuerdo a la NTC 2017⁵⁰.

⁵⁰ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS ICONTEC. *Adoquines de Concreto para Pavimentos*. Bogotá: ICONTEC, 2004 p.19 – 27.

- ✚ Variables intervinientes: Tamaño partículas agregado, contenido de humedad proceso de elaboración, conformado, y curado de los adoquines.

6.4 RECOLECCIÓN MATERIA PRIMA

6.4.1 Material biosólido. El biosólido con el que se realizó la investigación; se obtuvo de la planta de tratamientos de agua residual de la ciudad de Bogotá – PTAR El Salitre; en donde se generan aproximadamente 4500 Toneladas al mes de este tipo de residuos.

Figura 9. Ubicación PTAR el Salitre – Bogotá.



Fuente: (Corporacion Autonoma Regional de Cundinamarca, 2015)

6.4.2 Recolección del biosólido. Para la recolección de biosólidos se tuvo en cuenta la guía NTC-ISO 5667-13 (Gestión Ambiental, Calidad del agua. Parte 13, que se refiere al muestreo de lodos de aguas residuales y plantas de tratamiento de aguas.

6.4.3 Revisión del lugar para el muestreo. Se realizó una visita a las instalaciones de la PTAR El Salitre, el día 15 de agosto del año 2014; con el fin de determinar cuál es el lugar óptimo, para realizar una toma de muestra manual. Se define como mejor alternativa, hacer el muestreo en las bandas transportadoras⁵¹ (ver figura 10).

⁵¹ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMALIZACIÓN Y GESTIÓN AMBIENTAL. (1998). P - 21.

6.4.4 Muestreo, almacenamiento, manipulación y quema del biosólido. El proceso se realiza de forma manual, con pala; haciendo un muestreo aleatorio en un lugar puntual incluyendo el ancho total de la banda transportadora, con el fin de que la muestra de biosólidos no se vea alterada. La muestra se recogió y almacenó en bolsas plásticas de polietileno, selladas herméticamente entre lonas, con el fin de evitar escapes o alteración en la humedad (*Ver figura 12*).

El material biosólido fue conducido hasta el municipio de Ráquira, en donde se realizó la quema. Al incinerar el biosólido se redujo hasta un 65% su masa total; por lo cual para realizar este proyecto fue necesario traer más del doble del material calculado para realizar con éxito el proyecto. La que del biosólido se realizo en hornos totalmente funcionales a Gas natural; hornos que disminuyen los índices de contaminación del medio ambiente (*Ver figura 13*).

Figura 10. Revisión del lugar para el muestreo del material biosólido.	Figura 11. Almacenamiento, preservación y manipulación.
	
Figura 12. Hornos a gas natural, donde se quemó el biosólido.	
	

Fuente: Autor

6.5 CARACTERIZACIÓN DE MATERIAS PRIMAS.

Se realizan diferentes ensayos tanto al granito como a la arena, teniendo en cuenta las normas técnicas colombianas e INVIAS establecidas. A continuación se describen los tipos de ensayos que se van a tener en cuenta en el desarrollo del proyecto.

Tabla 6. Ensayos a realizar, materias primas.

MATERIAL	ENSAYO
GRANITO	I.N.V.E. - 213 - 13 Análisis granulométrico de los agregados gruesos y fino.
	I.N.V.E. - 223 - 13 Densidad relativa (Gravedad específica), y absorción del agregado grueso.
	Prueba de Humedad.
ARENA	I.N.V.E. - 213 - 13 Análisis granulométrico de los agregados gruesos y fino.
	I.N.V.E. - 222 - 13 Densidad relativa (Gravedad específica), y absorción del agregado fino.
	I.N.V.E. - 245 - 13 Determinación de la resistencia del agregado fino a la degradación por abrasión Micro - Deval.
	Prueba de Humedad.
BIOSÓLIDO	Al biosólido se le realizara un ensayo de tamizado según la granulometría de la arena a reemplazar.
	Caracterización Química del biosólido.
	Prueba de Humedad.
CENIZA DE BIOSÓLIDO	El material Se tritura o somete a desgaste en Maquina de los Ángeles, para obtener material granular más fino.
	Ensayo de tamizado según la granulometría de la arena que se remplazara.

Fuente: Autor

6.5.1 Granulometría granito y arena. Teniendo en cuenta la norma I.N.V.E. – 213 – 13 se tiene por objeto determina cuantitativamente la distribución de los tamaños de las partículas de los agregados grueso y fino de un material, por medio del tamizado. Para el proceso se dispuso de una serie adecuada de tamices, (1/2", 3/8", N°4, N°10, N°30, N°50, N°200.) La cantidad de muestra usada, tanto para el agregado grueso como el fino, es de 1 Kg.

Figura 13. Tamices seleccionados.



Fuente: Autor

Los datos registrados hacen referencia al peso retenido en cada tamiz.

Figura 14. Agregados, Granito y Arena.



Fuente: Autor

6.5.2 Densidad, densidad relativa (gravedad específica), y absorción del agregado grueso. De acuerdo a la norma I.N.V.E. – 223 – 13 el objetivo principal de este ensayo es determinar la densidad promedio de una cantidad de partículas de agregado grueso (sin incluir los vacíos entre ellas), la densidad relativa (gravedad específica) y la absorción del agregado grueso. En este proceso se sumerge en agua una muestra del agregado durante un periodo de 24 horas, para que las partículas llenen sus poros permeables, posteriormente se lava el material y con un paño se limpia el líquido superficial y se ingresa en una cesta para el pesaje al aire y sumergido con lo cual se determina la densidad aparente, nominal y absorción que requiere el agregado grueso.

Figura 15. Prueba de absorción de Agua del Granito.



Fuente: Autor

6.5.3 Densidad y absorción del agregado fino. Este ensayo tiene como objetivo principal, determinar la densidad promedio de una cantidad de partículas de agregado fino (sin incluir los vacíos entre ellas), teniendo en cuenta la norma I.N.V.E. – 222 – 13.

En el desarrollo de esta prueba se seleccionan 1500 g de arena, este se sumerge en agua durante un periodo de 24h, para llenar sus poros permeables. Una vez retiradas del agua, las partículas del agregado se secan superficialmente y se determina su masa. Posteriormente, la muestra (o parte de ella) se coloca en un recipiente graduado y se determina su volumen por medio del picnómetro, finalmente la muestra se seca al horno y se determina su masa seca (*Ver figura 17*).

Figura 16. Prueba de absorción y densidad de arena.



Fuente: Autor

6.5.4 Determinación de la resistencia del agregado fino a la degradación por abrasión micro-deval. Según la norma I.N.V.E. – 245 – 13, se describe el proceso mediante el cual se mide la resistencia a la degradación por abrasión de una muestra de agregado fino utilizando el aparato de micro Deval, en este ensayo se seleccionan 500 g de arena, que cumplan con la granulometría normalizada estipulada en los requisitos de la norma.

Figura 17. Prueba Micro - Deval.



Fuente: Autor

Por medio de este ensayo se busca determinar cuál es el porcentaje de pérdida de material granular fino, por el desgaste, que le proporcionan las esferas de acero después de una carga abrasiva.

6.5.5 Equivalente de arena. Según la norma I.N.V.E. – 133 – 13, se tiene por objeto principal determinar la proporción relativa del contenido de polvo fino nocivo, o material arcilloso, en los suelos o agregados finos, en este caso la arena, teniendo en cuenta el procedimiento descrito en la norma, este ensayo consiste en escoger una muestra de arena, que pase el tamiz N°4, aproximadamente 500 g del mismo.

Figura 18. Prueba equivalente de arena.



Fuente: Autor

6.5.6 Granulometría biosólido. La granulometría del biosólido se determinó siguiendo la norma I.N.V.E. – 213 – 13 (Análisis granulométrico de los agregados grueso y fino), que tiene por objeto principal determinar de manera cuantitativa la distribución de los tamaños de las partículas de suelo. En este ensayo se utilizaron 3,5 Kg de biosólido.

Figura 19. Muestra biosólido.



Fuente: Autor

Los tamices seleccionados son (1/2", 3/8", N°4, N°10, N°30, N°50, N°200), en este caso por tratarse de más cantidad de material se usó la tamizadora mecánica.

Figura 20. Tamizado biosólido.



Fuente: Autor

6.5.7 Caracterización química del biosólido. La prueba de caracterización química realizada a la muestra de biosólido, se basó en una prueba de laboratorio ejecutada en la ciudad de Bogotá en el laboratorio ambiental de la Universidad de los Andes. **(Ver Anexo 15)**

6.5.8 Contenido de humedad. Según la I.N.V.E. – 122 – 07 (Determinación en laboratorio del contenido de agua (humedad) de suelo, roca y mezclas de suelo-agregado). El contenido de agua del material se define como la relación, expresada en porcentaje, entre la masa de agua que llena los poros o "agua libre", en una masa de material, y la masa de las partículas sólidas de material. Se determinó el contenido de humedad para la arena, el granito y el biosólido.

Figura 21. Prueba de humedad de muestras.



Fuente: Autor

6.5.9 Trituración de cenizas de biosólido. El Biosólido al ser sometido a quema, se funde uniéndose y conformando unas escorias sólidas de diversos tamaños; por lo cual es necesaria su trituración, para así obtener un material granular más fino que se asemeje a las características del agregado fino “arena” el cual va a ser sustituido.

Para obtener un material fino más homogéneo, se llevaron las escorias conformadas por cenizas, las cuales se introdujeron en la máquina de los ángeles para realizar un triturado o desgaste del material, con el fin de no desperdiciar material. Para así después realizar el tamizado del material.

Figura 22. Trituración de cenizas de biosólido (Maquina de los Ángeles).



Fuente: Autor

6.6.0 Tamizado de las cenizas de biosólido. Para el proceso de tamizado de las cenizas, se dispuso de una serie adecuada de tamices, (1/2", 3/8", N°4, N°10, N°30, N°50, N°200).

Figura 23. Tamizado de las cenizas de biosólido.

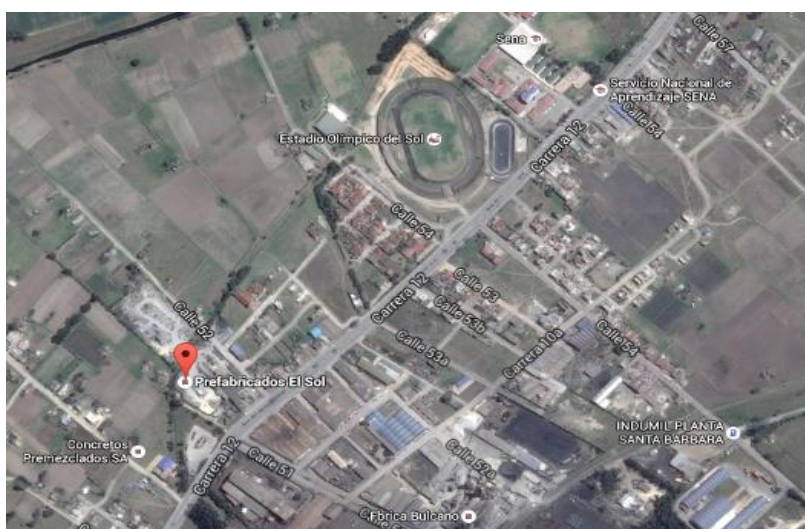


Fuente: Autor

6.7 ELABORACIÓN DE LOS ADOQUINES.

El proceso de elaboración de los adoquines, se realizó en la empresa “PREFABRICADOS DEL SOL LTDA.” Ubicada en la carrera 11 No. 50-55, sector Parque Industrial de la ciudad de Sogamoso – Boyacá. Esta empresa también fabrica postes para redes eléctricas y telefónicas, loseta para piso, bordillos, sardineles, tope llantas, separadores viales, tubos en concreto reforzado, Yees, codos, tapas y anillos para pozos de inspección, rejillas y postes para ceca.

Figura 24. Ubicación Fábrica Prefabricados Del Sol LTDA.



Fuente: Googlemaps

6.8 ESPECIFICACIONES EN LA ELABORACIÓN DEL ADOQUÍN.

Para la elaboración de los adoquines de concreto, se tuvo en cuenta la Norma Técnica Colombiana de adoquines en concreto para pavimentos, la NTC 2017⁵². Además de seguir el diseño de mezcla establecido por la empresa “PREFABRICADOS DEL SOL LTDA.” El cual contempla los parámetros exigidos por la norma; por lo que se decidió elaborar un adoquín tipo 1, rectangular biselado.

⁵² INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS ICONTEC. *Adoquines de Concreto para Pavimentos*. Bogotá: ICONTEC, 2004 p.25 – 27.

6.8.1 DIMENSIONES.

- + Longitud: 200 mm
- + Ancho: 10 mm
- + Espesor: 60 mm
- + Bisel: 3 mm

6.8.2 Número de especímenes. La NTC 2017 recomienda tener 10 especímenes para pruebas. 5 para realizar pruebas de absorción y densidad; y 5 para las pruebas de resistencia a la flexotracción. Se tiene en cuenta dos variables definidas; la primera: el porcentaje de cenizas de Biosólido a sustituir en la mezcla original (0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%); la segunda: los días de curado, para realizar los análisis físicos y mecánicos de los adoquines de concreto (7, 14 y 28 días).

El número total de elementos cerámicos a elaborar es de 180 adoquines, como se muestra a continuación en la tabla 4.

Tabla 7. Ensayos a realizar, materias primas.

<i>DÍAS</i>	% CENIZA DE BIOSÓLIDO					
	0%	5%	10%	15%	20%	25%
7	10	10	10	10	10	10
14	10	10	10	10	10	10
28	10	10	10	10	10	10

Fuente: Autor

6.9 PROPORCIONES Y MEZCLA DE MATERIALES.

Las mezclas que se muestra a continuación en la Tabla 8, se basan teniendo en cuenta la cantidad de cenizas de biosólido a incorporar (0%, 5%, 10%, 15%, 20% y 25%), también el número de adoquines, en este caso 30 por mezcla.

Las cantidades se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 8. Proporciones de mezcla por incorporación de cenizas de Biosólido.

MEZCLA PARA 30 ADOQUINES - PREFABRICADOS DEL SOL LTDA. - MODIFICADO POR AUTOR						
MATERIAL	(0% CB)	(5% CB)	(10% CB)	(15% CB)	(20% CB)	(25% CB)
CENIZA DE BIOSÓLIDO (L)	0	1	2	3	4	5
CEMENTO (kg)	15	15	15	15	15	15
AGUA (L)	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
ARENA (L)	20	19	18	17	16	15
GRANITO (L)	20	20	20	20	20	20

Fuente: Fabrica Prefabricados del sol LTDA. - Modificada Autor

Para garantizar que cada adoquín según su porcentaje, 5, 10, 15, 20 y 25% tengan cantidades adecuadas de cenizas de biosólido; se hicieron mezclas separadas por cada porcentaje a sustituir en la dosificación original de la empresa Prefabricados del Sol LTDA. Para un total de 30 adoquines por mezcla. Las cantidades a utilizar son las siguientes:

Tabla 9. Proporciones de mezcla por adoquín.

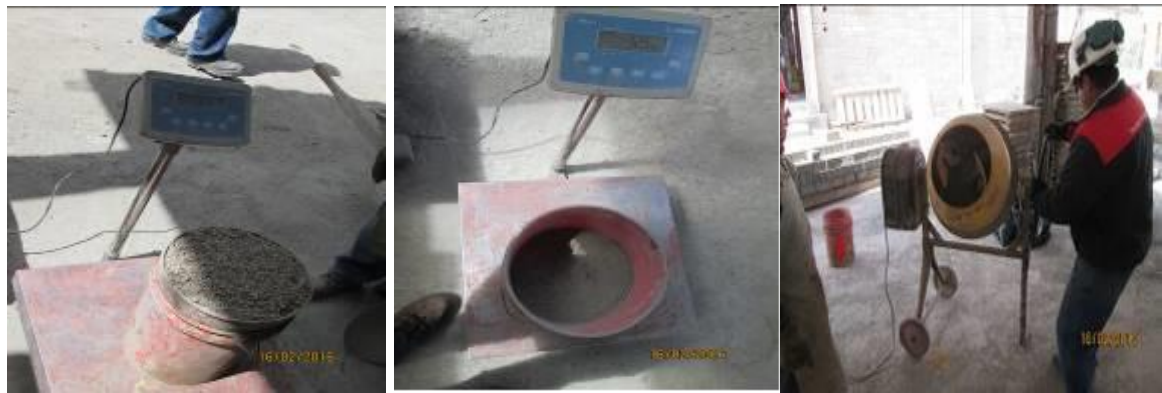
MEZCLA POR ADOQUÍN						
MATERIAL	(0% CB)	(5% CB)	(10% CB)	(15% CB)	(20% CB)	(25% CB)
CENIZA DE BIOSÓLIDO (L)	0	0.055	0.110	0.165	0.220	0.275
CEMENTO (kg)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
AGUA (L)	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12
ARENA (L)	0.67	0.63	0.60	0.57	0.53	0.50
GRANITO (L)	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67

Fuente: Autor

6.10 PROCESO DE ELABORACIÓN.

6.10.1 Mezclado. En el proceso de mezcla se empleó una balanza y un balde con medidas de volumen en L (Litros); unidades que plantea la fábrica “Prefabricados del Sol LTDA.” en su etapa de producción de adoquines de concreto. El balde es utilizado para el suministro de arena, grava, agua y cenizas de biosólido; siguiendo las mismas etapas de la producción industrial. (Ver figura 25)

Figura 25. Pesaje y mezclado de materias primas para la elaboración de adoquines de concreto.



Fuente: Autor

6.10.2 Procedimiento de mezclado. Este paso es el más importante, ya que de este dependían los resultados tanto en resistencia como en apariencia; por eso se realizó de la siguiente manera:

- ✚ El primer paso, consistía en ubicar el balde en la cual se pesaban todos los materiales según correspondía la dosificación.
- ✚ El segundo paso, consistía en pesar cada uno de los agregados, para que la mezcla fuera homogénea primero se mezcló la arena con la ceniza de biosólido, luego se aplicaron los demás agregados, cemento y Granito, dejando por último la aplicación del agua.

Figura 26. Arena con Ceniza de Biosólido.



Fuente: Autor

- ✚ Por último; cuando se obtenía la mezcla de concreto homogénea, esta era vertida en una batea para la posterior elaboración de las piezas de adoquín de concreto.

Figura 27. Vertido de la mezcla, para la elaboración de los adoquines.



Fuente: Autor

6.10.3 Elaboración de las piezas de adoquín de concreto. La elaboración se hizo de acuerdo a la metodología que emplea la empresa Prefabricados del Sol, la cual cuenta con una máquina que permite realizar producciones en serie con óptima calidad y en una gran diversidad de formas y dimensiones.

En este caso se eligió la forma de adoquín rectangular, biselado. La máquina garantiza la elaboración de 8 adoquines, cada 5 minutos. Cuenta con dos bandejas de 4 moldes cada una, al lado y lado del apisonador mecánico, cada obrero dispone y hace uso de una bandeja con sus respectivas plantillas de espesor.

El proceso consiste en agregar la mezcla manualmente, empleando recipientes que permitan un buen manejo de la mezcla y su disposición. Así esta se extiende uniformemente con una plantilla la cual determina el espesor del adoquín.

Figura 28. Vaciado y extendido de mezcla.



Fuente: Autor

Como son adoquines bicapa, la capa final que se aplica tiene como espesor 1cm, la que da el acabado en la cara superficial del adoquín.

Figura 29. Aplicación bicapa y extendido uniforme de mezcla.



Fuente: Autor

Por último se trasladan los moldes mediante unos rodillos, al centro de la maquina en donde se encuentra el compactador mecánico; el cual se encarga de dar la compactación adecuada al adoquín. Este proceso de compactación se lleva a cabo en tan solo 10 segundos.

Finalmente se retira y limpia por encima con brocha e inmediatamente se pueden pasar al proceso de curado.

Figura 30. Compactación y acabado final.



Fuente: Autor

6.10.4 Máquina compactadora. Esta máquina cuenta con una capacidad de compactación de aproximadamente 1500 PSI, (106 kg/cm²); permitiendo que las piezas de adoquín a pesar de la poca cantidad de agua que contienen, ofrezcan una forma y contextura resistente.

Figura 31. Máquina compactadora.



Fuente: Autor

6.11 MARCADO Y CODIFICACIÓN DE LOS ADOQUINES DE CONCRETO.

Teniendo en cuenta que se realizaron 30 adoquines por cada mezcla, distribuidos en las tres fechas de curado o periodos de falla (7, 14 y 28 días). El porcentaje de Cenizas de biosólido incorporado (0%, 5%, 10%, 15%, 20% y 25%). Se definió una nomenclatura de acuerdo a las condiciones descritas.

A medida que se elaboran los adoquines, estos se colocan sobre una estribo o soporte de madera, y se marcaban con pintura a base de aceite según el porcentaje de Cenizas de Biosólido incorporado, inicialmente se hacía marcado con nomenclatura romana por el estado húmedo de los adoquines. Días después de secado, se procedió a realizar el marcado respectivo de cada uno de los adoquines, estos fueron codificados con pintura en aceite de color amarillo.

Tabla 10. Codificación seleccionada para el macado de adoquines.

0CB7	0CB14	0CB28
5CB7	5CB14	5CB28
10CB7	10CB14	10CB28
15CB7	15CB14	15CB28
20CB7	20CB14	20CB28
25CB7	25CB14	25CB28
0CB7 → Descripción de la codificación empleada.		
0, 5, 10, 15, 20, 25 → % Porcentaje de material a sustituir.		
CB → Cenizas de Biosólido.		
7, 14, 28 → Días de curado.		

Fuente: Autor

Figura 32. Marcado y codificación de los adoquines.



Fuente: Autor

6.12 CURADO DE LOS ADOQUINES.

De acuerdo al proceso de elaboración, calidad y resistencia de la empresa Prefabricados del Sol LTDA., el tipo de curado empleado, consiste en rociar agua a los adoquines 2 veces al día, hasta el momento de su comercialización, generalmente 28 días después de su elaboración.

Para esta investigación se recomendó que los especímenes estuvieran totalmente sumergidos en agua, hasta el día de falla (7, 14 y 28 días).

Figura 33. Proceso de Curado.



Fuente: Autor

6.13 ANÁLISIS DE APARIENCIA Y MEDICIONES.

Teniendo en cuenta la (NORMA TECNICA COLOMBIANA 2017, 2004), Para evaluar el acabado y textura, se deben colocar los cinco especímenes de la muestra. Se empleó un calibrador de regla o pie de rey con divisores cada 0.1mm y un flexómetro, para realizar el análisis de dimensiones de los cinco adoquines.

Figura 34. Análisis y dimensiones.



Fuente: Autor

6.14 ANÁLISIS DE ABSORCIÓN DE AGUA Y DENSIDAD.

Para este ensayo se deben utilizar los cinco adoquines de la muestra después de haberles efectuado las mediciones.

Primero, fueron sometidos a secado en un horno ventilado a una temperatura entre 100 °C y 115°C. Los adoquines deben quedar separados entre sí como mínimo 25mm, estos se deben dejar durante un periodo de secado de 24 horas, hasta obtener su masa seca (Ms).

Figura 35. Secado.



Fuente: Autor

Una vez obtenida la masa seca (Ms), los especímenes se deben retirar del horno y se deben dejar enfriar, a temperatura ambiente, en un salón aireado, para someterlos luego al proceso de saturación.

Figura 36. Obtención de la masa seca y Enfriamiento a temperatura ambiente.



Fuente: Autor

Figura 37. Adoquines sumergidos 24h, para pruebas de (Ma y Mh).



Fuente: Autor

Los especímenes de ensayo se deben sumergir durante $24 \text{ h} \pm 2 \text{ h}$ dentro de un recipiente lleno de agua a una temperatura entre 15°C y 27°C .

Figura 38. Obtención de masa inmersa (Ma).



Fuente: Autor

Luego de este período de saturación se deben pesar los especímenes sumergidos en agua suspendidos mediante un alambre para obtener su masa inmersa en agua y suspendida (Ma). Luego se deben retirar del agua y se deben dejar escurrir durante 1 min, se debe secar luego el agua superficial con un paño seco y se deben pesar inmediatamente para obtener su masa saturada (húmeda) (Mh).

Figura 39. Obtención de masa saturada (Mh).



Fuente: Autor

6.15 ENSAYO DE RESISTENCIA A LA FLEXOTRACCIÓN

Los cinco especímenes de la muestra se deben utilizar y deben ser unidades completas. Una vez evaluadas la apariencia y las dimensiones, y encontrada la absorción de agua (Aa) y la densidad (D). Los especímenes deben permanecer saturados, por inmersión, durante las 24 h $\pm$ 2 h antes del ensayo, a una temperatura entre 15 °C y 27 °C. Luego se deben retirar del agua y se deben dejar escurrir durante 1 min.

Figura 40. Ensayo a Flexotracción MR.



Fuente: Autor

7. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN.

7.1 CARACTERIZACIÓN MATERIAS PRIMAS

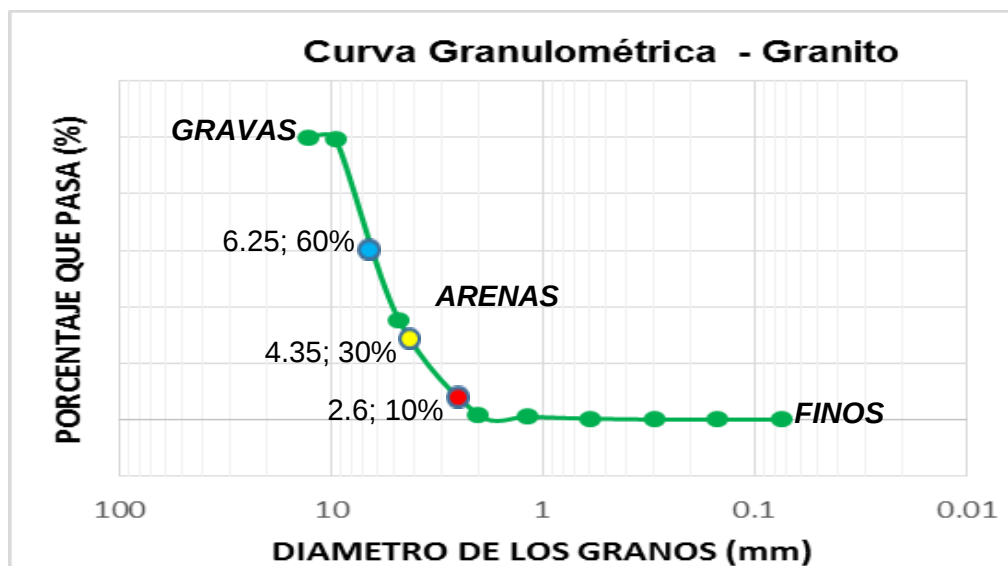
7.1.1 Granulometría granito. De acuerdo al ensayo granulométrico y a la caracterización física que se le hizo al agregado grueso “granito” (Ver Anexo 1), se determinó que se trata de un material compuesto de partículas de grano pequeño a mediano en su mayoría, considerado como un material granular de suelo tipo GW⁵³ (Gravas bien granuladas, mezclas de grava y arenas con pocos finos o sin ellos; Material permeable en estado compactado) como se observa en la Tabla 11.

Tabla 11. Porcentaje de material presente en el Granito.

GRAVA	60.07 %
ARENA	35.30 %
FINOS	0.03 %

Fuente: Autor

Grafica 1. Granulometría granito.



Fuente: Autor

En la gráfica se definieron los coeficientes de uniformidad y de curvatura, en estos se determina que no hay cambios considerables en el tamaño de las partículas, lo que quiere decir que es una muestra uniforme, que puede ser muy estable la cual posee secciones permeables.

⁵³ Universidad Católica de Valparaíso. (2008) Escuela de ingeniería en Construcción. *CLASIFICACIÓN DE SUELOS*. <http://icc.ucv.cl/geotecnia>.

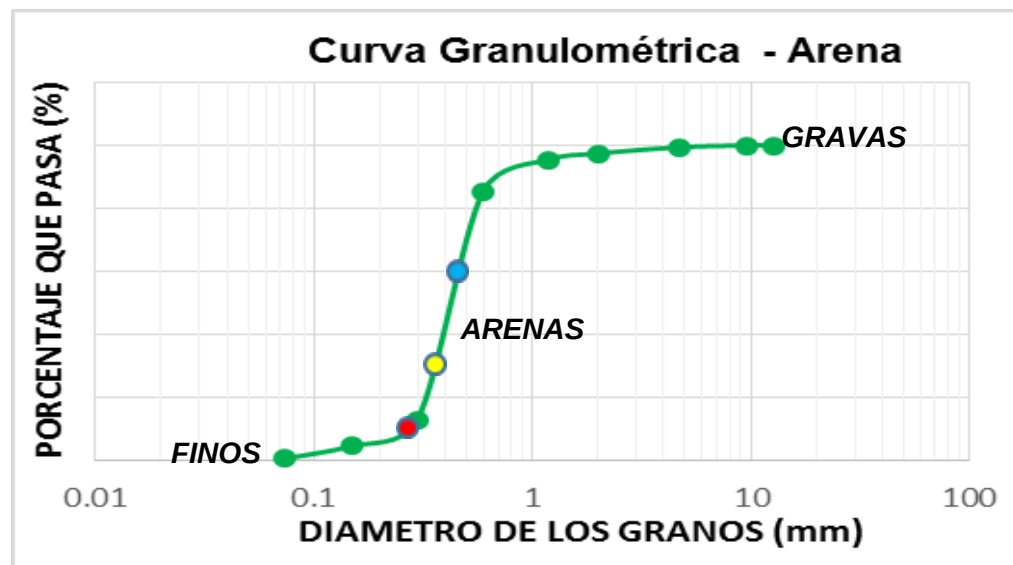
7.1.2 Granulometría arena. De acuerdo al ensayo granulométrico que se le realizó a la arena, se determinó que es una arena de tipo SP ⁵⁴(arenas con grava con pocos finos o sin ellos, material permeable en estado compactado).

Tabla 12. Porcentaje de material presente en la Arena.

GRAVA	0.51 %
ARENA	98.99 %
FINOS	0.51%

Fuente: Autor

Grafica 2. Granulometría Arena.



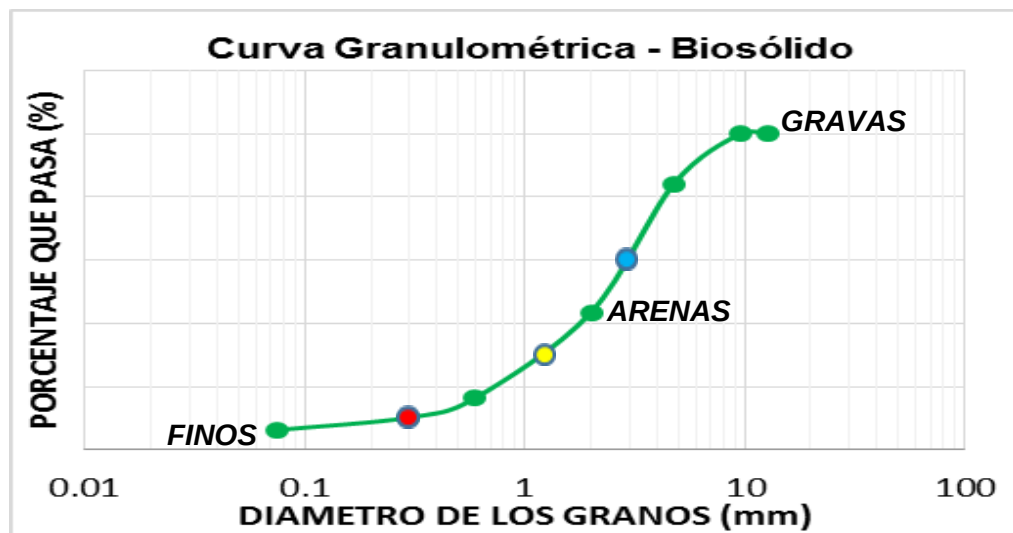
Fuente: Autor

Según los cálculos realizados (Ver anexo 2), y la gráfica granulométrica (Gráfica 2) se puede definir que el módulo de finura de la arena es de 2.05, lo cual demuestra que es una arena fina; ya que se busca un adoquín con textura suave y que proporcione manejabilidad a la masa de concreto, y se acomoda dentro de los intersticios del mismo, siendo un resultado óptimo para la elaboración de los especímenes.

⁵⁴ Universidad Católica de Valparaíso. (2008) Escuela de ingeniería en Construcción. *CLASIFICACIÓN DE SUELOS*. <http://icc.ucv.cl/geotecnia>.

7.1.3 Granulometría biosólido. Los resultados encontrados a partir de los cálculos realizados (Ver anexo 3), y de la curva granulométrica (Ver gráfica 3), muestra un suelo de partículas gruesas con presencia de arenas, arcillas y limos, ya que más del 50% de la fracción pasa el tamiz N° 4 y entre el 5-12 % pasa la malla N°200. Teniendo en cuenta lo anterior, se plantea que es un suelo SW-SM⁵⁵, es decir un suelo regularmente estable. La característica de este suelo se podría definir como arenas bien graduadas, con grava, con pocos finos o sin ellos; con presencia de limos y arcillas, semipermeable.

Grafica 3. Granulometría Biosólido.



Fuente: Autor

De acuerdo a la gráfica 3, se pueden definir las cantidades aproximadas de material grueso, arena y finos, teniendo en cuenta el diámetro de las partículas encontradas en la muestra de biosólido. (Ver tabla 10).

Tabla 13. Porcentaje de material presente en el Biosólido.

PARTÍCULAS GRUESAS	15.82 %
ARENA	77.97 %
FINOS	6.21%

Fuente: Autor

En la muestra de biosólido, se encontró que tiene un módulo de finura de 2.46 (Ver anexo 3); lo que quiere decir que es un material fino, sin embargo al encontrarse en el límite de esta clasificación también se podría entender que existe presencia de material grueso, aunque en cantidades más mínimas.

⁵⁵ Universidad Católica de Valparaíso. (2008) Escuela de ingeniería en Construcción. *CLASIFICACIÓN DE SUELOS*. <http://icc.ucv.cl/geotecnia>.

Tabla 14. Características materias primas.

PROPIEDADES	HUMEDAD (%)		ABSORCIÓN (%)	DENSIDAD RELATIVA	DENSIDAD APARENTE	RESISTENCIA, ABRASIÓN MICRO-DEVAL(%)
GRANITO	3		2	2.57	2.65	--
ARENA	5		10	2.1	2.3	10%
BIOSÓLIDO	INICIAL	FINAL	--	--	--	--
	88	9				

Fuente: Autor

Granito: Material que presenta una absorción aceptable y una densidad relativa que satisface completamente el criterio de aceptación, el cual se encuentra entre 2.33 a 2.75. Puede ser empleado en mezclas de concreto sin ningún inconveniente. **(Ver anexo 4)**

Arena: Material que mantiene una porosidad aceptable; en cuanto al porcentaje de absorción, la arena presento una absorción alta, de un 10% aproximadamente, el rango de aceptación, para mezclas de concreto esta de 0% al 5%. De acuerdo a lo anterior, la arena no cumple con los requerimientos, para ser usada como mezcla de concreto, esto no implica que el material no sea apto para la elaboración de los adoquines, ya que para dicho proceso se necesitan mezclas con resistencias más bajas y que posean una textura más pulida, lo cual se garantiza mediante arenas muy finas. Por tanto el agregado fino no es rechazado.⁵⁶ **(Ver anexo 5)**

El material fino conformado en su mayoría por arena, solo presento un 33% de material compuesto de limos o arcillas **(Ver anexo 6)**. Es un material que no posee pérdida significativa de material, ya que las pérdidas no superan el 10% después de ser sometidas pruebas de degradación por abrasión **(Ver anexo 7)** . en conclusión se pudo determinar según los resultados de la tabla 14, que el porcentaje de humedad más alto, lo presenta el biosólido; vale aclarar que es la humedad inicial, antes del proceso de secado **(Ver anexo 8)**.

⁵⁶ Urrutia María. (2015). *FABRICACIÓN DE ADOQUÍN ECOLÓGICO USANDO COMO MATERIA PRIMA BIOSÓLIDO DE PTAR (PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES)*. Universidad Santo Tomas. P 67 – 68

7.1.4 Caracterización química del biosólido.

En Colombia el Decreto 1287 del 2014, establece criterios para el uso de biosólidos generados por el proceso de tratamiento de aguas residuales. El tratamiento de las aguas residuales, combina una serie de procesos físico, químico y biológico; procesos mediante los que se obtiene lodo, material que debe ser sometido a procesos de estabilización para reducir la carga contaminante, y así obtener el biosólido.

La Planta de tratamiento de aguas residuales “El Salitre”, clasifica el biosólido como “tipo B” es decir, un material apto para usos de reforestación, pero sin aplicabilidad en el campo de la agricultura de consumo. De acuerdo a lo escrito anteriormente; esta investigación se desarrolló teniendo en cuenta en el Decreto 1287 – 2014, y la norma o Código de Registro Federal, Título 40 Parte 503 de la Agencia de Protección Ambiental EPA, mediante la cual se pudo identificar, que la muestra de biosólido, no sobrepasa en ningún componente los niveles de metales pesados, máximos permisibles, como se muestra en la siguiente tabla.

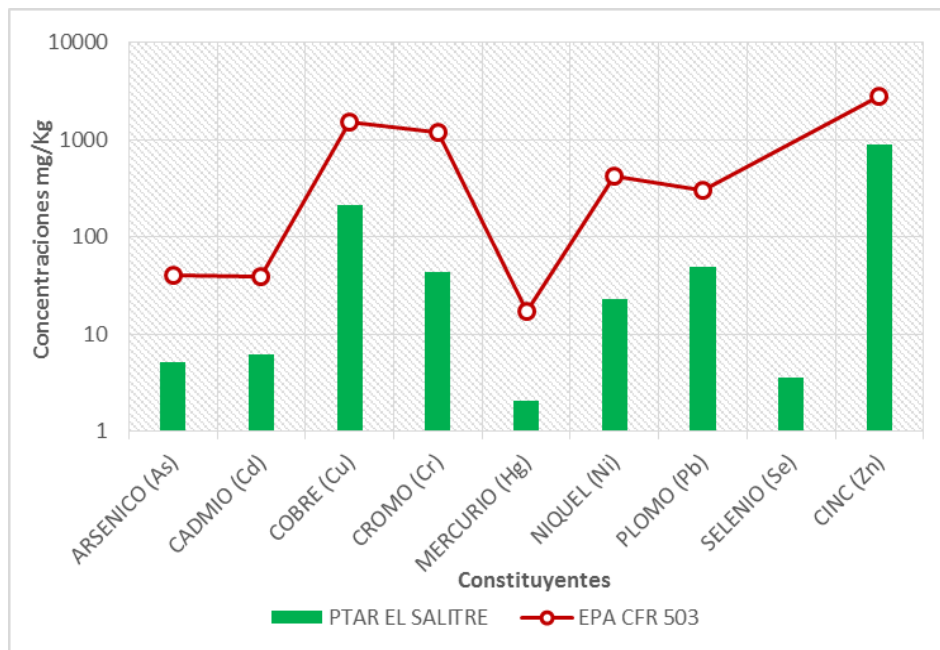
Caracterización: teniendo en cuenta que la PTAR el Salitre presenta caracterización química hasta el año 2012, se realizó una caracterización química el año 2014, para comprobar y ver el estado actual de la planta. La caracterización se realizó mediante el método de la EPA 3051 y EPA 6010 en el laboratorio integrado de Ingeniería Civil y Ambiental de Universidad de los Andes **(Ver anexo 15)**.

Tabla 15. Caracterización química del biosólido.

PARÁMETRO	CONCENTRACIÓN PTAR EL SALITRE (mg/Kg)	NORMA EPA 40CFR - 503
ARSÉNICO (As)	5.21	41
CADMIO (Cd)	6.13	39
COBRE (Cu)	212	1500
CROMO (Cr)	44.1	1200
MERCURIO (Hg)	2.05	17
NÍQUEL (Ni)	22.7	420
PLOMO (Pb)	49.2	300
SELENIO (Se)	3.57	NO APLICA
CINC (Zn)	890	2800

Fuente: Modificada

Grafica 4. Concentración promedio de metales en el biosólido.



Fuente: Autor

7.1.5 Cenizas de biosólido.

La cenizas se obtuvieron, mediante la quema del biosólido en un horno a gas natural en el municipio de Ráquira – Boyacá; para después llevar el material resultante “Cenizas de Biosólido”, a la fábrica de Prefabricados del sol LTDA. ubicada en la ciudad de Sogamoso, en donde se llevó a cabo la producción para la elaboración de los adoquines. Finalmente el curado y pruebas de Flexotracción, absorción y densidad, fueron realizadas en los laboratorios de Ingeniería Civil de la Universidad Santo Tomas – Tunja.

7.2 ANÁLISIS APARIENCIA Y MEDICIONES

7.2.1 Mediciones. De acuerdo al análisis y mediciones, realizado a los especímenes de adoquín (Ver Anexos 16-21), se determinó que las medidas no varían representativamente, respecto a la cantidad de cenizas de biosólido incorporado en los adoquines, ni al tiempo de curado de los mismos.

Tabla 16. Promedio medidas de adoquín, según cantidad de cenizas de biosólido.

ADOQUÍN	LARGO (cm)	ANCHO (cm)	ALTO (cm)
0% CB	20.1	10.06	6.09
5% CB	20.1	10.06	6.22
10% CB	20.1	10.05	6.14
15% CB	20.1	10.05	6.17
20% CB	20.1	10.06	6.21
25% CB	20.1	10.09	6.16

Fuente: Autor

En la tabla 17, se puede observar que no hay cambios representativos en las medidas de los adoquines que incluyen el 5%, 10%, 15%, 20% y 25%, con respecto a los adoquines convencionales con el 0% de cenizas de biosólido.

7.2.2 Apariencia. La apariencia física de los adoquines, varía de acuerdo a la cantidad de cenizas de biosólido incorporado, esto se puede identificar observando la textura de cada adoquín (**Ver figura 44**).

De acuerdo al incremento en el porcentaje de cenizas de biosólido, los adoquines presentan cambio en su apariencia, tienden a cambiar de color gris a marrón. En cuanto a su forma, Algunas piezas presentan desmoronamientos y desportillamiento hacia los extremos o puntas de la cara inferior. Los adoquines no presentan ningún tipo de olor aun en estado de curado (**Ver anexo 22**).

Figura 41. Apariencia adoquines (0%, 5%,10%, 15%, 20% y 25%).

0% Cenizas de Biosólido	5% Cenizas de Biosólido
	
10% Cenizas de Biosólido	15% Cenizas de Biosólido
	
20% Cenizas de Biosólido	25% Cenizas de Biosólido
	

Fuente: Autor

7.3 ANÁLISIS DE RESISTENCIA A LA FLEXOTRACCIÓN O MODULO DE ROTURA.

Los análisis se llevaron acabo en los respectivos dias de curado 7, 14 y 28 días; en donde 30 adoquines distribuidos en 6 clases de mezcla, asi: 5 adoquines con el 0% de cenizas de biosoido, 5 adoquines con el 5% de cenizas de biosolido, 5 adoquines con el 10% de cenizas de biosolido, 5 adoquines con el 15% de cenizas de biosolido, 5 adoquines con el 20% de cenizas de biosolido y 5 adoquines con el 25%.

7.3.1 Falla a los 7 días. Las pruebas se realizaron, de acuerdo a los paramteros especificados en la norma (NTC – 2017). Los ensayos de apariencia, resistencia y de absorcion de agua se realizaron en el laboratorio de la facultad de ingenieria civil, de la Universidad Santo Tomas. (Ver anexos 23 a 29).

Los adoquines fallados a los 7 días (CB7), poniendo como referencia el adoquín de mezcla convencional (0% de cenizas de biosólido); a excepción de los adoquines con el 5% cenizas de biosólido, las mezclas con el 10, 15, 20 y 25% de cenizas de biosólido cumplen con los parámetros especificados en la (NTC – 2017); ya que el ensayo de resistencia a la flexotracción de estas piezas de adoquín, superan el parámetro mínimo que es de 3.8 MPa, como piezas individuales; y de 4.2 MPa, como promedio de 5 adoquines (**Ver Grafica 5**).

7.3.2 Falla a los 14 días. El ensayo de resistencia a la flexotraccion corresponente a los 14 dias de curado, se realizo en el laboratorio de la facultad de Ingenieria Civil, de la Universidad Santo Tomas. Donde 30 adoquines divididos en 6 clases de especimenes (0%, 5%, 10%, 15%, 20% y 25% de Cenizas de biosolido).

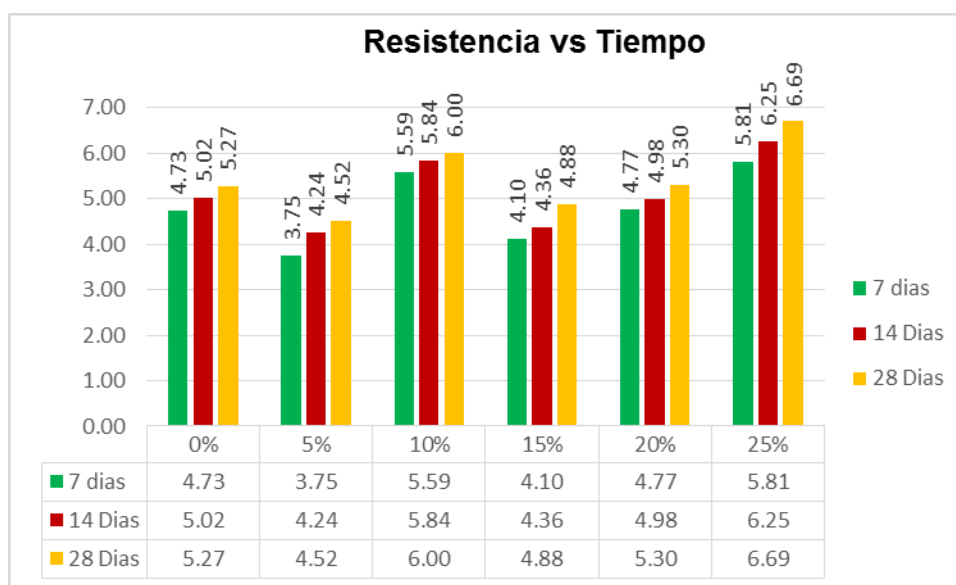
Los adoquines fallados a los 14 días (CB14), presentan muy buenas resistencias, cumpliendo con los parámetros exigidos por la norma. El ensayo de resistencia a la flexotracción, de estas piezas de adoquín superan el parámetro mínimo que es de 3.8 MPa, como piezas individuales; y de 4.2 MPa como promedio de 5 adoquines. Se puede observar que a mayor días de curado, aumentan las resistencias de acuerdo a cada porcentaje. La resistencia debería presentar una tendencia creciente de acuerdo a los porcentajes de mezcla de cenizas del 0% al 25%. (**Ver Grafica 5**).

7.3.3 Falla a los 28 días. Esta falla se llevo a cabo a los 28 días, en donde 30 adoquines divididos en 6 clases de especímenes (0%, 5%, 10%, 15%, 20% y 25% de cenizas de bisólido). El ensayo de resistencia a la flexotracción se realizo en el laboratorio de la facultad de Ingenieria Civil de la Universidad Santo Tomas.

Los adoquines fallados a los 28 días (CB28), presentan muy buenas resistencias. El ensayo de resistencia a la flexotracción, de estas piezas de adoquín superan el parámetro mínimo que es de 3.8 MPa, como piezas individuales; y de 4.2 MPa como promedio de 5 adoquines.

De acuerdo al proceso de curado, del cual se esperaba que permitiera que la resistencia de los adoquines aumentara; se obtuvo un resultado positivo el cual se puede observar en la **Grafica 5** de resistencia a la flexotracción, que de acuerdo al paso de los días y al tipo de curado, los adoquines adquirieron más resistencia.

Grafica 5. Resistencia vs Tiempo 7, 14 y 28 días (Estadísticamente).



Fuente: Autor

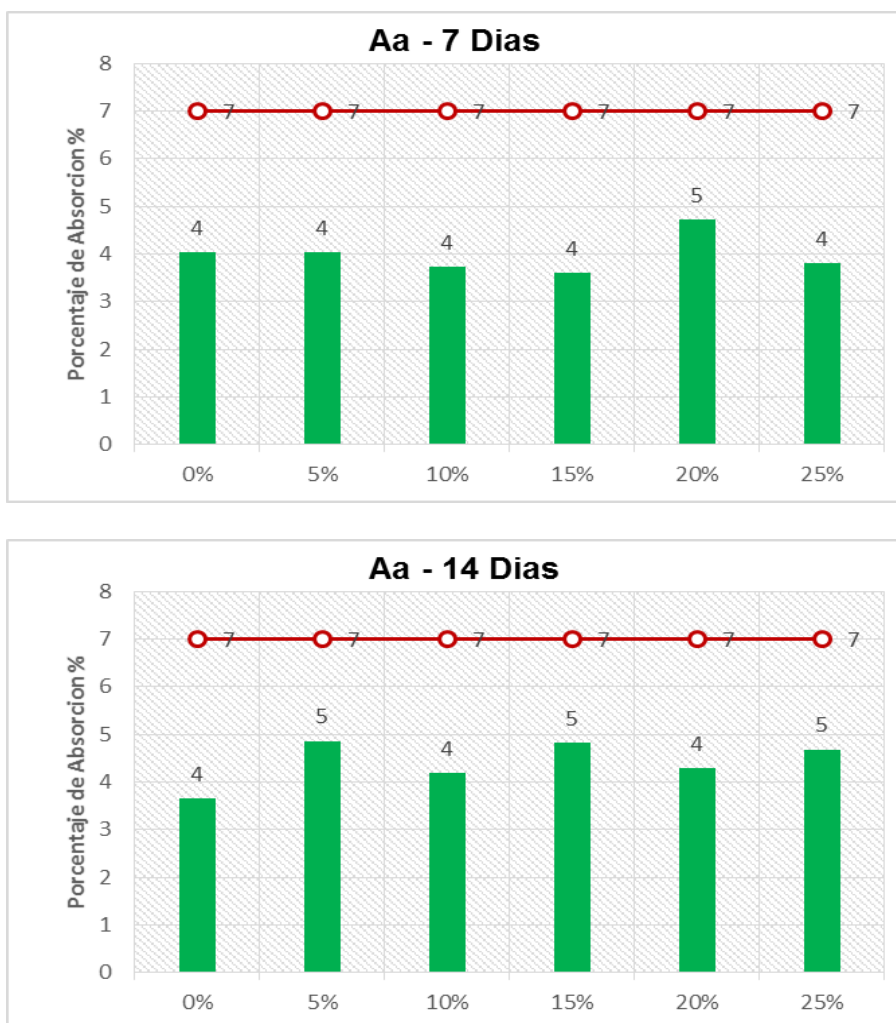
De acuerdo a la **Grafica 5** resistencia vs tiempo; se pudo observar que la resistencia aumenta de acuerdo a los días de curado 7, 14 y 28 días, esto se presenta para los 6 tipos de mezcla (5%, 10%, 15%, 20% y 25% de cenizas de biosólido). La resistencia debería presentar una tendencia creciente de acuerdo a los porcentajes de mezcla de cenizas del 0% al 25%; se presenta un pico alto en cuanto a la mezcla correspondiente al 10%, lo cual se puede estar presentando por algún tipo de reacción química que se desconoce y se escapa de los objetivos de esta investigación.

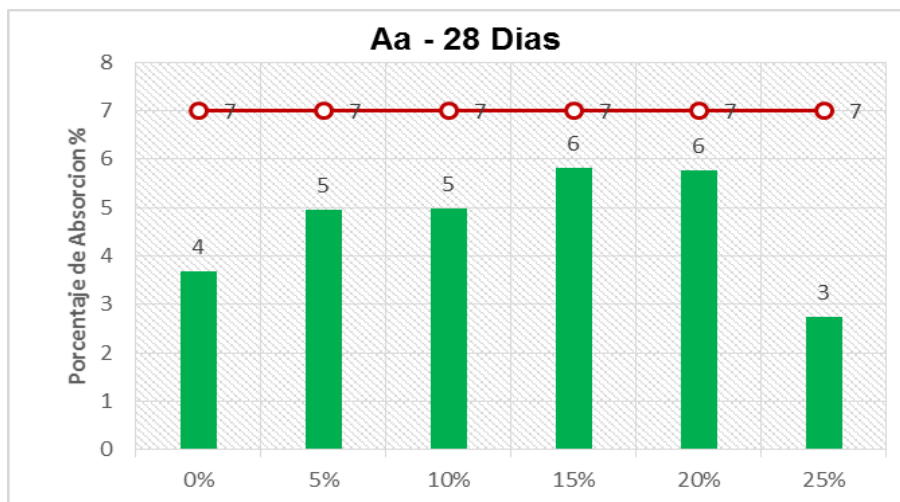
7.4 ABSORCIÓN DE AGUA Y DENSIDAD.

De acuerdo a los análisis y cálculos realizados a los especímenes, se pudo determinar que la absorción de los adoquines, varía de acuerdo a la cantidad de Cenizas de biosólido incorporado en la mezcla y aumenta la absorción de acuerdo a los días de curado 7, 14 y 28 días (**Anexo F**).

Los 6 diferentes tipos de mezclas, para los días de curado 7 y 14 no presentan cambios significativos de absorción. Para los 28 días de curado, aumenta la absorción de las mezclas con el 5%, 10%, 15% y 20% de cenizas de biosólido; sin sobrepasar el parámetro establecido por la (NTC – 2017), la cual exige un valor máximo de 7% de absorción por cada espécimen. En la mezcla correspondiente al 25%, por el contrario disminuyó la absorción.

Grafica 6. Absorción de agua (7, 14 y 28 días).





Fuente: Autor

Se observa en la **Gráfica 6**, que el tiempo de curado de los adoquines, interviene en diferentes variaciones del porcentaje de absorción, en unas permanece un porcentaje estable, en otra aumenta y en otras disminuye. La primera fecha de falla (7días), los porcentajes de las mezclas son equitativos, y a medida que aumentan los días de curado, algunos adoquines aumentan su porcentaje de absorción, otros se mantienen estables con respecto a la fecha anterior, y otros disminuyen. Esto se podría estar presentando debido algún tipo de reacción química entre las cenizas de biosólido y los demás agregados que conforman la mezcla para la elaboración de los adoquines de concreto, lo que permite que se presente mayor absorción de los adoquines al paso de los días de curado.

Los resultados obtenidos en la prueba de absorción de agua fueron positivos, ya que todas las mezclas cumplen y ninguna sobrepasa el 7% exigido en la norma (NTC – 2017).

De acuerdo a la prueba de densidad de los adoquines, se pudo observar que es una variable independiente en cuanto a la cantidad de Cenizas de biosólido que poseen cada mezcla, ya que los valores varían unos de otros e incluso cuando se trata de la misma cantidad de cenizas de biosólido, sin embargo se pudo observar que el tiempo de curado de los adoquines va de la mano con prueba de densidad, ya que a menor tiempo de curado menor densidad presentan los adoquines.

8. CONCLUSIONES.

- ✚ Con esta investigación, se ha demostrado que se pueden Incluir Cenizas de Biosólido, como material sustituyente del agregado fino “arena”, para la elaboración de adoquines de concreto, empleados para pavimentos flexibles. Ya que las dosificaciones que incluían el 5%, 10%, 15%, 20% y 25% de cenizas de biosólidos, cumplieron con todas las especificaciones de la norma Técnica Colombiana NTC - 2017.
- ✚ El tiempo es proporcional a los resultados de las pruebas realizadas a los adoquines. Por ejemplo la resistencia a la flexotracción, a mayor tiempo de curado por inmersión en agua, los adoquines presentaban mayor resistencia; de lo cual se puede analizar que entre más tiempo se dejaron madurar las piezas de adoquín de concreto con cenizas de biosólido, mayor fue la hidratación que cada espécimen adquirió para desarrollar al paso del tiempo una mejor resistencia, en este caso superior a las exigidas por la norma NTC - 2017.
- ✚ A mayor cantidad de cenizas de biosólido, los adoquines presentan un cambio en su apariencia, presentan cambio de color con tendencias entre gris y marrón, desde la primer proporción sustituida se nota el cambio de color. La manipulación de estos se hace de forma normal, ya que las piezas son muy sólidas y no presentan ningún tipo de pérdida de material. Las cenizas de biosólido resultaron ser un material compatible con el agregado fino (arena). Estas no presentaron ningún tipo de olor en las etapas de elaboración y pruebas de resistencia, absorción de agua y densidad de los adoquines.
- ✚ Los adoquines presentan una absorción la cual no varía mucho entre los 6 tipos de mezclas elaboradas; en algunos casos sus porcentajes de absorción son iguales, y mantienen el mismo porcentaje durante los días establecidos de curado; en otros caso aumenta significativamente, pero ninguno de los porcentajes supera el máximo establecido por la norma que es del 7% de absorción; siendo así los adoquines aptos para emplearlos en pavimentos flexibles, ya que no presentarían pérdida de material, desmoronamientos, fisuras lo cual permita su aplicabilidad.
- ✚ La densidad de los adoquines no depende del porcentaje de cenizas de biosólido que este incluya. De acuerdo a la prueba realizada, se pudo establecer que a mayor tiempo de curado, menor densidad presentarían los especímenes.

9. RECOMENDACIONES

- ✚ Realizar un estudio incorporando hasta un 50% de cenizas de biosólido, con el fin de determinar su comportamiento en la resistencia a la flexotracción.
- ✚ Utilizar otra forma de curado para los adoquines, con el fin de comparar los resultados obtenidos mediante las pruebas físicas, mecánicas, de absorción de agua y resistencia a la flexotracción.
- ✚ Realizar un estudio del comportamiento químico entre las cenizas de biosólido con respecto a los demás agregados que conforman la mezcla para la elaboración de los adoquines, con el fin de tener información y poder definir porque en las resistencias se presentan valores muy elevados con respecto a porcentajes bajos o altos de material sustituido.
- ✚ Hacer un estudio de costos, de la implementación de este material como sustituyente de materia prima; con respecto al usualmente empleado en la elaboración de los adoquines de concreto.
- ✚ Utilizar las herramientas y elementos de protección adecuados en especial cuidar los ojos; desde el momento en que se manipule e incinere el biosólido, hasta el momento de la elaboración de los adoquines, ya que el polvillo que generan las cenizas puede causar resequedad o crear algún tipo de reacción con la piel.

10.BIBLIOGRAFÍA.

Agencia de protección ambiental, (1994). *Estándares para la utilización o eliminación de lodos de depuradora*. www.epa.gov/biosolids/plain-english-guide-epa-part-503-biosolids-rule.

Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos - EPA. (2016). BIOSÓLIDOS. Última actualización 28 de Enero. www.epa.gov.

Aruna Ukwatta, Abbas Mohajerani, N. E. (2016). *VARIATION IN PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF FIRED-CLAY BRICKS INCORPORATING ETP BIOSOLIDS*. Science Direct, P. 76 – 85.

Daniel Idalgo, Ricardo Poveda, Víctor Cárdenas PhD. (2013). Obtención de adoquines fabricados con vidrio reciclado como agregado. *Escuela politécnica nacional*. Quito – Ecuador.

Decreto 1287. (10 de Julio de 2014). *CRITERIOS PARA EL USO DE LOS BIOSÓLIDOS GENERADOS EN PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES*. Ministerio de vivienda, ciudad y territorio. wsp.presidencia.gov.co.

Departamento de sanidad de Estados Unidos. (1995). *MANUAL DE TRATAMIENTO DE AGUAS NEGRAS, P.31– 40*. LIMUSA – Noriega Editores.

E. Caicedo, R. Mejía, M. Gordillo y J. Torres, (2015). *REUTILIZACIÓN DE UN RESIDUO DE LA INDUSTRIA PETROLERA (FCC) EN LA PRODUCCIÓN DE ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS*. Universidad del Valle (CENM), Cali, y Materiales y Medio Ambiente, de la Universidad Nacional, Sede Palmira, Colombia. Derechos, Pontificia Universidad Javeriana. P. 135 – 154.

Eco-sitio, (2009). *Contaminación del agua a causa de la minería*. <http://www.eco-sitio.com.ar>.

Gian Paolo Dágner G. (2004). *GESTIÓN DE BIOSÓLIDOS EN COLOMBIA. Planta de Tratamiento de Aguas Residuales El Salitre*. Universidad de La Salle.

Gomá, F. (1979). *EL CEMENTO PORTLAND Y OTROS AGLOMERANTES*. (Editores Técnicos Asociados S.A., Ed.) Barcelona, España: Editorial Reverté. Recuperado el 01 de 10 de 2014

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS ICONTEC. *Adoquines de Concreto para Pavimentos*. Bogotá: ICONTEC, 2004.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMALIZACIÓN Y GESTIÓN AMBIENTAL. (1998).

Instituto Colombiano de productores de cemento. (1986). *FABRICACIÓN DE ADOQUINES DE CONCRETO*. ICPC, 16.

Instituto Colombiano de Productores de Concreto. Guillermo Madrid. *CONSTRUCCIÓN DE PAVIMENTOS DE CONCRETO*. http://www.construdata.com/BancoConocimiento/C/cartilla_de_adoquines.

Instituto del Concreto – Asocreto. (2006). *AGREGADOS*. Asocreto.

Instituto del Concreto – Asocreto. (2006). *DURABILIDAD Y PATOLOGÍA DEL CONCRETO*. Asocreto

Iván Granada, Gustavo Plaza; (2009). Utilización de lodos residuales de una planta de anodizado de aluminio, para la fabricación de ladrillos y adoquines. *Corporación ecuatoriana de aluminio Cedal S.A.* Ecuador.

Jorge Buzón Ojeda, (2009). Uso del cuesco de palma africana en la fabricación de adoquines y bloques de mampostería. *Seventh LACCEI Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology (LACCEI'2009) "Energy and Technology for the Américas: Education, Innovation, Technology and Practice" June 2-5, 2009*. San Cristóbal, Venezuela.

Juan Alberto Vélez Zuluaga. (2007). *LOS BIOSÓLIDOS: ¿UNA SOLUCIÓN O UN PROBLEMA? P+L*. P 1-10. www.lasallista.edu.co.

Materiales estructurales en las construcciones civiles. (1989). *CEMENTO PORTLAND*. Fernández González, Rosalba.

Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2014). *DECRETO 1287 DE 2014 – CRITERIOS PARA EL USO DE LOS BIOSÓLIDOS GENERADOS EN PLANTAS DE TRATAMIENTOS DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES*. Ley 142 de 1994. 1-20

Norma Técnica Colombiana - NTC 2017. (2004). *ADOQUINES DE CONCRETO PARA PAVIMENTOS*. Bogotá D.C., Colombia: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). Ed. 03 DE Abril.

Norma Técnica Colombiana - NTC 6008. (2013). *TERMINOLOGÍA Y CLASIFICACIÓN PARA ADOQUINES Y LOSETAS DE CONCRETO*. Bogotá D.C., Colombia: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). Ed. 17 de Julio.

Osorio, J. D. (2010). *HIDRATACIÓN DEL CONCRETO: AGUA DE CURADO Y AGUA DE MEZCLADO*. 360 ° EN CONCRETO, 1-3.

P. Higuera & R. Oyarzun, (2006). *Impactos de la minería en el medio natural*. Curso de Minería y Medio Ambiente. <http://www.uclm.es/users/higuera/mam>

Pedro Matthey, Rafael Robayo. (2014). *APLICACIÓN DE CENIZA DE CASCARILLA DE ARROZ OBTENIDA DE UN PROCESO AGRO-INDUSTRIAL PARA LA FABRICACIÓN DE BLOQUES EN CONCRETO NO ESTRUCTURALES*. Universidad del Valle – Cali. Colombia.

Productos y servicios. (2016). CEMEX – CEMENTO. www.cemex.com

Ramallo, R. (1983). *TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUALES*. Bogotá: Editorial Reverté, S.A.

REGLAMENTO TÉCNICO DEL SECTOR DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO BÁSICO (RAS), T. D. (2000). *TÍTULO D. SISTEMAS DE RECOLECCIÓN Y EVACUACIÓN DE AGUAS RESIDUALES DOMESTICAS Y PLUVIALES*. Bogotá, D.C.: MinDesarrollo.

Tratamiento de aguas y lodos PTAR Salitre. (s.f.). *ACUEDUCTO AGUA Y ALCANTARILLADO DE BOGOTÁ*. Recuperado el 26 de Diciembre de 2014, de www.acueducto.com.co.

Universidad Católica de Valparaíso. (2008) Escuela de ingeniería en Construcción. *CLASIFICACIÓN DE SUELOS*. <http://icc.ucv.cl/geotecnia>.

Urrutia María, (2015). *FABRICACIÓN DE ADOQUÍN ECOLÓGICO USANDO COMO MATERIA PRIMA BIOSÓLIDO DE PTAR (PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES)*. Universidad Santo Tomas. Colombia.

V. Sakhare, R. R. (2015). *USE OF BIO-BRIQUETTE ASH FOR THE DEVELOPMENT OF BRICKS*. Science Direct, P. 684- 689

William R. MOZO-MORENO, (2014). *BIOSÓLIDOS DE PTAR COMO MATERIA PRIMA PARA LA FABRICACIÓN DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN COMO LOS LADRILLOS*. Universidad Santo Tomas Tunja, Docente.