

ELABORACIÓN DE MEZCLAS DE CONCRETO CON INCLUSIÓN DE
BIOSÓLIDO PROCEDENTE DEL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.

YELITZA MARGARITA ARGÜELLO TOCA
YEISSON STIVEN NEIRA CABRA



UNIVERSIDAD SANTO TOMAS
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
TUNJA
2018

ELABORACIÓN DE MEZCLAS DE CONCRETO CON INCLUSIÓN DE
BIOSÓLIDO PROCEDENTE DEL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.

YELITZA MARGARITA ARGÜELLO TOCA

YEISSON STIVEN NEIRA CABRA

Proyecto de grado como requisito parcial para optar por el título de Ingeniero Civil.

Director Metodológico:

William Ricardo Mozo Moreno
Ingeniero Civil. Msc

Directora Técnica:

Marian Isabel Avella Pesca
Ingeniera Civil. Esp



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

TUNJA

2018

~

DEDICATORIA

YEISSON STIVEN NEIRA CABRA

En primer lugar este trabajo está dedicado a Dios, a mis padres 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 mi hermano y mi abuelita por acompañarme en este proceso que siempre han estado a mi lado con y sin dificultades, brindándome su apoyo y cariño para lograr este sueño.

YELITZA MARGARITA ARGÜELLO TOCA

Este trabajo está dedicado a Dios por la bendición y el privilegio que me ha dado de poder estudiar, a mis padres por sus oraciones, esfuerzo, dedicación, paciencia y sacrificio para lograr esta meta, a mi hermana, mis hermanos, mis sobrinos y mis tías por la motivación que me brindan cada día. Finalmente a mis amigos por estar siempre conmigo brindándome su apoyo incondicional.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Dios, a nuestros padres, hermanos y familiares que estuvieron presentes acompañándonos en este proceso, por su apoyo incondicional. A nuestros directores de tesis, Ingeniera Esp. Marian Isabel Avella Pesca y al Ingeniero M.Sc. William Ricardo Mozo Moreno, por su valiosa guía y colaboración en el asesoramiento durante la elaboración de este proyecto y a todas las personas que hicieron parte de este proceso. Sabemos que no fue fácil cumplir con esta meta, hoy nos sentimos orgullosos de cumplir con nuestro propósito.

Nota de aceptación

Jurado 1 _____

Jurado 2 _____

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN	11
ABSTRACT	12
INTRODUCCIÓN	13
1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	14
1.1. DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA.....	14
1.2. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN	16
2. JUSTIFICACIÓN.....	17
3. OBJETIVOS.....	18
3.1. OBJETIVO GENERAL	18
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS:.....	18
4. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	19
4.1. ESTADO DEL ARTE.....	19
4.2. MARCO TEÓRICO	23
4.2.1. Aguas residuales.	23
4.2.2. Tratamiento de aguas.	24
4.2.3. Tratamiento de lodos.	24
4.2.4. Biosólidos.....	25
4.2.4.1. Características de los biosólidos.....	25
4.2.4.2. Clasificación de los biosólidos.	27
4.2.4.3. Alternativas de aprovechamiento de biosólidos	28
4.2.5. Materias primas para la elaboración de concreto	29
4.2.5.1. Cemento.	29
4.2.5.3. AGUA.....	33
5. METODOLOGIA	35
5.1. TIPO DE MÉTODO	36
5.2. RECOLECCIÓN DEL BIOSÓLIDO	36
5.2.1. Revisión del lugar para muestreo.	37
5.2.2. Muestreo, almacenamiento, manipulación y secado del biosólido.....	37
5.3. CARACTERIZACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS	39

5.3.1. GRAVA	39
5.3.1.1. Granulometría.	39
5.3.1.2. Gravedad específica.	40
5.3.1.3. Contenido de humedad.....	41
5.3.2. ARENA.....	41
5.3.2.1. Granulometría.	41
5.3.2.2. Gravedad Específica.....	42
5.3.2.3. Contenido humedad.....	43
5.3.3. BIOSÓLIDO	44
5.3.3.1. Granulometría.	44
5.4. ESPECIFICACIONES EN LA ELABORACIÓN DE LOS ESPECÍMENES	45
5.4.1. Dimensiones de los especímenes	45
5.4.2. Numero de especímenes	45
5.5. PROPORCIONES Y MEZCLAS DE LOS AGREGADOS.....	46
5.6. PROCESO DE ELABORACIÓN DE LOS ESPECÍMENES	48
5.6.1. Mezclado.....	48
5.6.2. Procedimiento de mezclado.....	49
5.6.3. Elaboración de los especímenes:	50
5.6.4. Marcado de los especímenes de concreto.....	51
5.6.5. CURADO DE LOS ESPECÍMENES.	52
5.7. ENSAYOS REALIZADOS A LAS MEZCLAS Y ESPECÍMENES DE CONCRETO	52
5.7.1. Ensayo para determinar el asentamiento del concreto	52
5.7.2. Ensayo para la determinación del contenido de aire en el concreto fresco.	53
5.7.3. Ensayo de resistencia a la compresión.....	53
5.7.4. Ensayo de resistencia a la tensión indirecta.	54
6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN.....	55
6.1. GRANULOMETRIA DE LA ARENA.....	55
6.2. GRANULOMETRÍA DE LA GRAVA.....	56
6.3. GRANULOMETRIA DEL BIOSÓLIDO	57
6.4. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DEL BIOSÓLIDO.....	58
6.5. ANÁLISIS MEDICIÓN Y APARIENCIA DE LOS ESPECIMENES DE CONCRETO.	60

6.5.1. Mediciones.....	60
6.5.2. Apariencia.....	60
6.6. ANÁLISIS ENSAYOS CON MEZCLA FRESCA.....	61
6.6.1. Contenido de aire.....	61
6.6.2. Asentamiento	63
6.7. ANÁLISIS ENSAYOS DESTRUCTIVOS.	64
6.7.1. Ensayo de resistencia a compresión	64
6.7.1.1. Falla a los 14 días.....	64
6.7.1.2. Falla a los 28 días.....	65
6.7.1.3. Falla a los 56 días.....	66
6.7.2. Ensayo a la tensión indirecta	69
6.7.2.1. Falla a los 14 días.....	70
6.7.2.2. Falla a los 28 días.....	70
6.7.2.3. Falla a los 56 días.....	71
7. CONCLUSIONES	72
RECOMENDACIONES.....	74
BIBLIOGRAFÍA.....	75

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores límites por la EPA Norma CFR 40 parte 503 para biosólidos	28
Tabla 2. Clasificación cemento portland	31
Tabla 3. Tipos De Cemento Portland En Colombia	31
Tabla 4. Clasificación del agregado fino.	32
Tabla 5. Requisitos de gradación para agregado grueso.	33
Tabla 6. Ensayos a realizar, materias primas.	39
Tabla 7. Ensayos a realizar, materias primas	46
Tabla 8. Proporciones de mezcla base 0%.....	46
Tabla 9. Proporciones de mezcla por incorporación del 5% Biosólido.....	47
Tabla 10. Proporciones de mezcla por incorporación del 10% Biosólido.....	47
Tabla 11. Proporciones de mezcla por incorporación del 15% Biosólido.....	48
Tabla 12. Codificación seleccionada para el marcado de los especímenes	51
Tabla 13. Características de la arena	56
Tabla 14. Características de la grava	57
Tabla 15. Caracterización química del biosólido.....	58
Tabla 16. Comparación con el decreto 1287 del 2010.....	59
Tabla 17. Promedio de medidas de los especímenes según cantidad de biosólido incorporado.....	60
Tabla 18. Contenido de aire.....	62
Tabla 19. Asentamiento	63
Tabla 20. Promedio resistencia a la compresión en la falla de los 14 días.....	65
Tabla 21. Promedio resistencia a la compresión en la falla de los 28 días.....	65
Tabla 22. Promedio resistencia a la compresión en la falla de los 56 días.....	66
Tabla 23. Factor de modificación para la desviación estándar de la muestra cuando se dispone menos de 30 ensayos.....	67
Tabla 24. Resistencia promedio a la compresión requerida cuando no hay datos disponibles para establecer una desviación estándar de la muestra.	68
Tabla 25. Promedio resistencia a la tensión indirecta en la falla de los 14 días	70
Tabla 26. Promedio resistencia a la tensión indirecta en la falla de los 28 días	70
Tabla 27. Promedio resistencia a la tensión indirecta en la falla de los 56 días	71

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Metodología	3535
Figura 2. Ubicación PTAR El salitre- Bogotá	36
Figura 3. Muestreo	388
Figura 4. Almacenamiento y manipulación	388
Figura 5. Secado.....	388
Figura 6. Tamices seleccionados.....	40
Figura 7. Prueba de absorción de agua de la grava	40
Figura 8. Prueba de humedad de muestras.....	411
Figura 9. Tamices seleccionados.....	422
Figura 10. Prueba de absorción y densidad arena	43
Figura 11. Prueba de humedad de muestras.....	44
Figura 12. Muestra biosólido.....	44
Figura 13. Tamizado Biosólido.....	45
Figura 14. Pesaje de materias primas para la elaboración de los especímenes de concreto	4949
Figura 15. Mezcla de Arena, Grava, Cemento y Biosólido	49
Figura 17. Elaboración de especímenes.....	500
Figura 18. Secado de los especímenes de concreto con inclusión de Biosólido	500
Figura 19. Curado de los especímenes de concreto	522
Figura 20. Ensayo de asentamiento	52
Figura 21. Ensayo de contenido de aire	53
Figura 22. Ensayo de resistencia a compresión	53
Figura 23. Ensayo de resistencia a tensión indirecta.....	54
Figura 24. Granulometría del biosólido	577
Figura 25. Apariencia especímenes.....	611
Figura 26. Ensayo de contenido de aire	62
Figura 27. Ensayo de asentamiento	64

RESUMEN

El biosólido es un subproducto generado por el tratamiento de las aguas residuales, este material está compuesto por diferentes metales pesados y materia orgánica. El proyecto fue realizado con biosólido tipo B procedente de la PTAR el SALITRE ubicada en la ciudad de Bogotá.

El propósito de esta investigación es evaluar desde el punto de vista técnico la inclusión de biosólido como material sustituyente parcial de materia prima (Arena) para la elaboración de concreto. Para un adecuado desarrollo en la elaboración de la investigación, se realizó una caracterización de las materias primas de la elaboración de concreto, como lo son: arena, grava, biosólido.

Para el desarrollo del trabajo se prepararon cuatro tipos de mezclas, la primera sin adición de biosólido, la segunda reemplazando el 5% del agregado fino por la misma cantidad de biosólido, la tercera y cuarta mezcla de la misma forma pero con porcentajes de reemplazo de 10% y 15% respectivamente. Se realizaron ensayos con mezcla fresca (Ensayo de asentamiento (NTC-396) y ensayo de contenido de aire (NTC-1032), se evaluaron las propiedades mecánicas como: resistencia a la compresión y a la tensión indirecta; Los ensayos mecánicos se evaluaron en edades de 14, 28 y 56 días; todo esto de acuerdo a las Normas Técnicas Colombianas NTC 396,673, 722,1032.

Finalmente se puede concluir que la resistencia a la compresión y a la tensión indirecta de los especímenes que se sustituyó parcialmente la arena por biosólido se ven afectados; esta resistencia se ve disminuida con respecto a la mezcla base la cual no tiene inclusión de biosólido; a medida que aumenta la cantidad de biosólido presente en las mezclas disminuye la resistencia de los especímenes.

ABSTRACT

Bio solid solution is a sub-product generated by the treatment of residual water, this material is composed of different heavy metals and organic matter. The project was done with Bio Solid solution provided by PTAR el Salitre located in the city of Bogota.

The purpose of this investigation was to evaluate from a technical point of view the inclusion of Biosolid as a substitution of raw material (sand) to elaborate concrete. For an accurate development of the investigation, a comparison of the raw materials to elaborate concrete was done, which are: Sand, Grava, Biosolid.

To develop the following job four types of mixtures were prepared, the first one was done without adding Biosolid, the second one replacing 5% of the fine aggregate to the same quantity of Biosolid, the third and fourth mixtures of the same but with percentages of 10 and 15 respectively. Experimental tries were done with fresh mixture (settlement (NTC-396) and air containment (NTC-1032)), the mechanical proprieties were evaluated such as: resistance to compression and to the indirect tension; The mechanical tries were evaluated in ages from 14,28, and 56 days; all this according to the Colombian technical Norms NTC 396,673, 722,1032.

Finally, it can be concluded that the resistance to compression and to the indirect tension of the specimens that the sand was partially replaced by Biosolids are affected; this resistance is diminished with respect to the base mixture which has no inclusion of biosolids; As the amount of Biosolids present in the mixtures increases, the resistance of the specimens decreases.

INTRODUCCIÓN

Las políticas de protección del recurso hídrico en Colombia, han fomentado la construcción de plantas para el tratamiento de las aguas residuales. Aunque éstas logren reducir notablemente los contaminantes presentes en el agua, también generan subproductos (biogás y biosólidos), los lodos producidos tienen un tratamiento complementario para ser convertidos en Biosólidos.

La entrada en operación de nuevas estaciones de tratamiento de aguas residuales, ha generado un incremento en la producción de biosólidos, siendo un riesgo para la salud y el medio ambiente por lo cual se ha restringido la descarga de estos residuos en ríos, vertederos, suelos, rellenos etc.

Así mismo el alto consumo de materiales de construcción como el concreto, genera un consumo excesivo de materias primas, que habitualmente se encuentran en la naturaleza, siendo la extracción de recursos naturales un impacto importante, generador de afectaciones ambientales, llevando a entidades de protección del ambiente y gobiernos distritales y nacionales a limitar cada vez más el acceso a estos recursos.

El incremento en la producción de biosólidos ha propiciado la investigación para evaluar su potencial de aprovechamiento en la aplicación de estos subproductos en la elaboración de materiales de construcción (concreto); teniendo en cuenta la magnitud de producción de este subproducto y la demanda de este tipo de materiales, permitiendo una opción viable para la reutilización de dichos residuos realizando una incorporación de estos en la producción de concreto sustituyendo en distintos porcentajes el árido fino (arena) empleada para la elaboración del concreto.

El propósito de la investigación, va encaminada a evaluar la viabilidad técnica de incorporar biosólidos como material para la elaboración de concreto buscando reducir los índices de contaminación generados por la disposición final de estos subproductos. Desarrollando una alternativa para reintegrarlo a una vida útil y así poder valorizar éste, de tal manera que cumpla con parámetros técnicos y genere beneficio ambiental; para dicho propósito se presentan en este documento los objetivos a los que irá encaminada la investigación, además se describe el estado del arte a nivel mundial para concretos con adición de biosólidos, sus propiedades y comportamientos. Se realiza la caracterización física y mecánica de los agregados, se plantea el programa experimental, se evalúan los resultados de los diferentes ensayos y por último se plantean conclusiones y recomendaciones.

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA

Las fuentes de agua están cada día más contaminadas por esto el proceso de tratamiento de aguas residuales antes de ser vertidas a los cuerpos de agua es una manera eficiente de disminuir la contaminación y contribuir a la conservación del recurso hídrico. A medida del paso del tiempo las industrias y las entidades gubernamentales han tomado conciencia de la importancia de la construcción de plantas de tratamiento de agua residual (PTAR) por lo que se ha incrementado el número de PTAR existentes; un ejemplo de esto son las acciones tomadas y planeadas a futuro para la PTAR EL SALITRE y el proyecto de recuperación del río Bogotá.¹ Con la ampliación de la PTAR salitre a 8000 litros por segundo previendo el crecimiento de la población y ampliación del acueducto, la adecuación del sistema de alcantarillado de las cuencas Fucha y Tunjuelo, para separar aguas lluvias de aguas residuales, conduciendo las residuales a la PTAR del sur², son algunas de las acciones que contribuyen a la disminución de la contaminación de los cuerpos de agua.

En la actualidad el proceso aplicado en la Planta es un Tratamiento Primario Químicamente Asistido, con el cual se logran remociones del 40 por ciento de materia orgánica y un 60 por ciento de sólidos suspendidos totales. Lo anterior permite obtener biosólidos generados por el de tratamiento de aguas y lodos³, sin dejar a un lado que el principal producto de la PTAR Salitre es el agua tratada.

El proceso de tratamiento del agua residual genera el biogás y los biosólidos, los cuales son subproductos muy importantes en cuanto a su posibilidad de aprovechamiento y en relación con un esquema de sostenibilidad ambiental en el que el enfoque respecto a los residuos ya no es el de un problema que debemos esconder sino que por el contrario, dentro del mismo ciclo natural de transformación de la energía, es posible transformarlos en productos aprovechables que se reintegran al ciclo productivo de manera limpia, disminuyendo el impacto sobre el medio ambiente. Debido a la generación de estos subproductos y a su disposición final algunas empresas han venido investigando en la disposición final de este material y en la reutilización del biosólido generado en la PTAR, sabiendo que la deshidratación de los lodos

¹ AVELLA, Marian; incorporación de cenizas de biosólido de PTAR en mezclas de mortero. Tunja, 2014. Trabajo de grado (Especialista en estructuras). Universidad pedagógica y tecnológica de Colombia UPTC. Ingeniería civil.

² Acueducto, agua y alcantarillado de Bogotá. Productos PTAR SALITRE. [En línea]. [17/06/2017]. Disponible de:<<http://www.acueducto.com.co>>

³ Acueducto, agua, alcantarillado y aseo de Bogotá. « ¿Qué hace la ciudad para descontaminar el río Bogotá?» s.f. [En línea]. [17/06/2017]. Disponible de:<<http://www.acueducto.com.co>>

digeridos permite una producción media mensual de biosólido en la PTAR Salitre de 4500 toneladas al mes⁴

La gran cantidad de material generado del tratamiento que se realiza a las aguas residuales, el posible aumento en la tasa de producción por la construcción y puesta en marcha de las estructuras complementarias de la PTAR el salitre y el decremento en cuanto a la oferta de los lugares de disposición normal, temporal o de emergencia; son algunos de los factores que motivan la investigación de la aplicación de estos subproductos en la elaboración de materiales de construcción, en este caso concreto.⁵

La disposición del biosólido en rellenos sanitarios es una de las formas más comunes para deshacerse de este material residual. Esta práctica genera un problema serio, el cual tiene su explicación en el alto contenido de nitrógeno presente en el biosólido; nitrógeno que al no ser absorbido por las plantas, es fácilmente lixiviado y movilizado pudiendo generar eutrofización y contaminación por nitratos en los mantos acuíferos⁶. Adicional al problema anterior, la presencia de altos porcentajes de nitratos y fosfatos en los suelos podría causar que en el ciclo hidrológico de recarga de los mantos acuíferos, las aguas que se infiltran entren en contacto con este compuesto y contaminen el agua generalmente usada para consumo humano. La presencia de nitratos en el agua potable implica un riesgo en la salud, sobre todo para los infantes.⁷

Debido a los problemas ya mencionados se hace indispensable establecer nuevas alternativas que permitan el aprovechamiento de este material y eliminen o aplacen la opción de disposición en vertederos o en áreas de disposición. La investigación que se propone sería una propuesta innovadora para la gestión ambiental realizada por la PTAR pues son escasos los estudios realizados y todos están enfocados al aprovechamiento del biosólido como enmienda orgánica del suelo.⁸

⁴ Acueducto, agua, alcantarillado y aseo de Bogotá. « ¿Qué hace la ciudad para descontaminar el río Bogotá?» s.f. [En línea]. [17/06/2017]. Disponible de: <<http://www.acueducto.com.co> >

⁵ MOZO, William. Elaboración de ladrillos incorporando como materia prima biosólidos de PTAR. Tunja, 2013, 103p. Trabajo de Investigación (Elaboración de ladrillos incorporando como materia prima biosólidos de PTAR). Universidad pedagógica y tecnológica de Colombia, Universidad santo tomas – Tunja, Empresa de acueducto y alcantarillado de Bogotá, Planta de tratamiento de aguas residuales el salitre.

⁶ UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA. Manejo de sólidos residuales o biosólidos. [En línea]. [17/06/2017]. Disponible de: <<http://www.oocities.org/edrochac/residuales/biosolidos9.pdf>>

⁷ UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA. Manejo de sólidos residuales o biosólidos. [En línea]. [17/06/2017]. Disponible de: <<http://www.oocities.org/edrochac/residuales/biosolidos9.pdf>>

⁸ Acueducto, agua y alcantarillado de Bogotá. Productos PTAR SALITRE. [En línea]. [17/06/2017]. Disponible de: <<http://www.acueducto.com.co>>

1.2. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Es viable desde el punto de vista técnico, incluir un porcentaje de biosólido producido por la PTAR EL SALITRE como un sustituto parcial del árido fino (arena) en la fabricación de concreto?

2. JUSTIFICACIÓN

El tratamiento realizado a las aguas residuales que está reduciendo el riesgo de contaminación del entorno ambiental, este esfuerzo realizado por mejorar la calidad de los efluentes vertidos a los cuerpos de aguas receptores podría verse opacados por una ineficiencia en el manejo y disposición de los subproductos generados; situación que podría llegar a generar problemas ambientales graves. Entre los cuales está la contaminación de las aguas superficiales por escorrentía, la contaminación de las aguas subterráneas y/o acuíferos por lixiviación, la contaminación de los suelos por un elevado contenido de metales pesados, la presencia de olores desagradables y problemas de salud pública⁹.

En la actualidad la PTAR EL SALITRE de Bogotá, procesa 4m³/s de aguas residuales las cuales generan 4500 toneladas de biosólido al mes¹⁰, por lo cual la investigación está dirigida a estudiar la alternativa de incorporación de biosólido como material para la fabricación de concreto para la construcción. Dentro de los propósitos que tiene la investigación se encuentran: el aprovechamiento del residuo por medio de la incorporación de este en la fabricación de concreto, la prevención de una contaminación futura por la disposición final del biosólido, la disminución de la cantidad del residuo destinada a los vertederos, la disminución en la demanda de áreas para la disposición y la generación de una alternativa más de aprovechamiento en el programa de gestión de la PTAR; alternativa que le permitiría a la planta prevenir un posible almacenamiento del biosólido.

Además de esto la investigación permitirá el aprovechamiento del subproducto generado por la PTAR y contribuir con las políticas de desarrollo sostenible, abriendo una nueva fase de investigación la cual estaría enfocada en la incorporación de este material para la producción de concreto en una escala industrial.

⁹ MOZO, GOMEZ, CAMARGO. Efecto de la adición de biosólido (seco) a una pasta cerámica sobre la resistencia mecánica de ladrillos. Universidad de Medellín. Revista ingenierías. Medellín. [En línea]. [16/06/2017]. Disponible en: < <http://www.scielo.org.co/pdf/rium/v14n27/v14n27a05.pdf> >

¹⁰ Acueducto, agua y alcantarillado de Bogotá. Productos PTAR SALITRE. [En línea]. [21/02/2018]. Disponible de:<<http://www.acueducto.com.co>>

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar la viabilidad de incorporar Biosólido de la PTAR EL SALITRE como un sustituto parcial del árido fino (arena) en mezclas de concreto.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Comparar las características físicas y mecánicas del concreto, elaborado con agregados convencionales (arena, grava y biosólido).
- Evaluar la resistencia a la compresión y a la tensión indirecta de las mezclas con porcentajes de 5%, 10% y 15% de inclusión de biosólido con respecto a la mezcla base (sin inclusión de biosólido).
- Definir la mezcla óptima de fabricación de concreto relacionadas con el porcentaje de adición de biosólido.

4. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

4.1. ESTADO DEL ARTE

En el marco de la política de preservación de la calidad del agua, se han construido plantas de tratamiento de aguas residuales-PTAR, las cuales generan subproductos sólidos (Biosólidos). La aplicación de Biosólidos en el sector de la construcción como materia prima para distintos elementos constructivos, es un tema de investigación importante para disminuir la contaminación que generan y regresarlos a la vida útil.

Existen estudios sobre la reutilización de biosólidos aplicados en la elaboración de concretos, morteros y ladrillos; obteniendo resultados positivos al comparar los lodos producidos por plantas de tratamiento de agua potable con lodos producidos por plantas de tratamiento de agua residual, determinando que los lodos producidos por la potabilización del agua tienen altos contenidos de sulfatos y al elaborar materiales como morteros y hormigones se van a ver afectados por efectos corrosivos. Sin embargo, en una primera etapa de este estudio se realizó un muestreo y caracterización de los lodos de una planta potabilizadora que utiliza sulfato de aluminio como coagulante. En una segunda etapa se prepararon especímenes cúbicos de 2 pulgadas de lado, compuestos de mezclas binarias y ternarias de lodo (en diferentes proporciones: 90, 75, 40 y 25%), y combinado con materiales como cemento, cal, yeso y arena, y se determinó su resistencia a la compresión y contracción por secado, para seleccionar la mejor mezcla. Con base en los resultados de las pruebas realizadas se determinó que las mezclas binarias, compuestas por 90% lodo y 10% cemento y 90% lodo y 10% cal, presentaron valores más altos de resistencia a la compresión, con respecto al reportado para morteros tipo I y concretos de relleno. La mejor mezcla ternaria compuesta por 90% lodo, 5% yeso y 5% cemento, presentó un valor superior al valor recomendado para un mortero tipo II. Todas estas mezclas presentaron valores de contracción por secado superiores al 50% debido al alto porcentaje de humedad intersticial del lodo.¹¹ Por otro lado los lodos que se producen en el tratamiento de aguas residuales mostraron ser efectivos para la producción de materiales para la construcción como morteros, en el cual el lodo fue utilizado en forma de ceniza la cual cumple la misma función de la cal; para el hormigón sustituyendo el agregado fino determinando los porcentajes de sustitución por medio de la

¹¹ CERÓN, Oswaldo; MILLÁN, Sandra; ESPEJEL, Fabricio; RODRÍGUEZ, Arturo; RAMÍREZ, Rosa María. Aplicación de lodos de plantas potabilizadoras para elaborar morteros y concretos. Instituto de Ingeniería, UNAM. Coordinación de Ingeniería Ambiental. [En línea] [10/11/2017] Disponible de: <https://www.researchgate.net/publication/267369262_APLICACION_DE_LODOS_DE_PLANTAS_POTABILIZADORAS_PARA_ELABORAR_MORTEROS_Y_CONCRETOS>

relación peso volumen y para ladrillos utilizando una dosis del 5% de su volumen. Al realizar las diferentes pruebas de laboratorio determinaron que los materiales mostraron un mejor comportamiento y resistencias adecuadas para posibles usos estructurales.¹² Otro trabajo analizó el uso de cenizas de lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales en hormigón haciendo una revisión bibliográfica, análisis y síntesis de los datos, con el cual buscaba la mayor cantidad de información que se pueda recolectar y así mirar diferentes posibilidades para implementar las cenizas como materia prima para elaborar diferentes materiales para la construcción como lo es el cemento, mortero y mezclas de hormigón, así como finos, rellenos y agregados ligeros, se ha implementado como agregado fino reemplazando la arena en un 10% en la mezcla dando resultados satisfactorios. El resultado del uso de cenizas en mezclas de hormigón con inclusiones hasta de un 40% como agregado fino ha sido comparado y en ocasiones han superado el control de la mezcla superando el diseño de mezcla.¹³

Así mismo, se realizó una experimentación piloto mediante la fabricación de bloques en una planta industrial, utilizando mezclas con porcentajes de sustitución de árido fino del 5, 10 y 15% por cenizas de lodo de depuradora, cuyos resultados fueron comparados con bloques de referencia (sin adición). Los ensayos realizados son los respectivos para realizar una comercialización de estos bloques, los cuales deben cumplir la normativa europea, lo cual les permitió comprobar las características físicas y mecánicas de los hormigones. Los resultados que obtuvieron fueron prometedores: les permitió la utilización del residuo y su comercialización; estos muestran que la utilización de este material mejora las características de los bloques como la resistencia a compresión, y permitiría reducir un gran volumen de material utilizado habitualmente como materia prima y consumir un residuo destinado a vertedero. En función de los resultados obtenidos en la investigación se puede decir que la fabricación de bloques de hormigón en los que se ha sustituido parcialmente arena por cenizas de lodos de depuradora es comercialmente viable. La sustitución de arena en un 15% por cenizas de lodos de depuradora permite mejorar características de los bloques de hormigón como la resistencia a la compresión y no mermar sustancialmente otras como la densidad y la absorción capilar.¹⁴

¹² BERMEO, Andrea; IDROVO, Edgar. Aprovechamiento de lodos deshidratados generados en plantas de tratamiento de agua potable y residual como agregado para materiales de construcción. Universidad de Cuenca. Ecuador. [En línea]. Disponible de: <<http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/20868>>

¹³ CIARÁN, J. Lynna; RAVINDRA K. Dhirab; GURMEL, S. Ghataoraa; ROGER P. Westb; Sewage sludge ash characteristics and potential for use in concrete. Construction and Building Materials. Volume 98, 15 November 2015, Pages 767-779. [En línea] [14/07/2017] Disponible de: <<http://www.sciencedirect.com>>

¹⁴ CARRIÓN, María; BAEZA, Francisco; GÁRCES, Pedro; GALAO, Oscar; PÁYA, Jordi. Uso potencial de ceniza de lodo de depuradora como sustitución de árido fino en bloques de hormigón

El Biosólido implementado en la elaboración de ladrillos, determinó la mejor alternativa en cuanto a % de incorporación de biosólido y temperatura de cocción con base en los resultados obtenidos de la caracterización (NTC 4205) de los elementos cerámicos. Las unidades de mampostería con inclusión de biosólido hasta un 10% son las de mejor comportamiento a los ensayos realizados por esto cumplen lo dicho por la NTC 4205 y pueden ser usadas como unidades de mampostería estructural de uso interior para muros de cierre o divisorios que únicamente atiendan a la carga de su propio peso.¹⁵ Mientras que el estudio en la fabricación de ladrillos cerámicos se evaluó el uso de lodo aluminoso; los resultados muestran que es viable incorporar estos lodos en reemplazo parcial de uno de los materiales constitutivos del ladrillo, en este caso la arena en un porcentaje del 10%; dando resultados favorables los cuales demuestran que es viable la incorporación de estos lodos para la fabricación de ladrillos no estructurales cumpliendo la normativa sin embargo, para evitar comprometer la resistencia a la compresión debe optimizarse la deshidratación previa del lodo para aumentar el potencial de aprovechamiento. El ladrillo obtenido cumple características adecuadas para uso no estructural, sin embargo se tiene que tener en cuenta la época de producción del lodo (invierno y verano) puesto que cambia la cantidad de aluminio presente en el lodo y este puede afectar la resistencia a la compresión de los ladrillos.¹⁶ En cuanto a la elaboración de adoquines de concreto, se realiza la elaboración de estos reemplazando cenizas de biosólido como material sustituyente del agregado fino (arena) cuyo fin es emplearlos en pavimentos flexibles. Se pudo demostrar que se pueden incluir ya que las condiciones que incluían 5%, 10%, 15%, 20% y 25% de cenizas de biosólidos, cumplieron con todas las especificaciones de la norma técnica NTC-2017.¹⁷

Existen otras investigaciones enfocadas en la elaboración de concreto implementando materiales considerados desechos como las cenizas de fondo y volantes de carbón como remplazo de arena y cemento. Las muestras de concreto se prepararon incorporando 0, 20, 50, 75 y 100% de ceniza de fondo reemplazando arena y 20% de ceniza de carbón por masa, como un sustituto del cemento Portland ordinario. Se determinaron las propiedades de estado fresco y

prefabricados. España. [En línea]. [13/07/2017] Disponible de: <
<https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/36270>>

¹⁵ MOZO, William. Elaboración de ladrillos incorporando como materia prima biosólidos de PTAR. Tunja, 2013, 103p. Trabajo de Investigación (Elaboración de ladrillos incorporando como materia prima biosólidos de PTAR). Universidad pedagógica y tecnológica de Colombia, Universidad santo tomas – Tunja, Empresa de acueducto y alcantarillado de Bogotá, Planta de tratamiento de aguas residuales el salitre.

¹⁶ TORRES, Patricia; HERNANDEZ, Darwin; PAREDES, Diego. Uso productivo de lodos de plantas de tratamiento de agua potable en la fabricación de ladrillos cerámicos. Chile. Revista Ingeniería de Construcción Vol. 27 No3, Diciembre de 2012, Pág. 145 – 154. [En línea] [18/11/2017] Disponible en: <http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-50732012000300003>

¹⁷ PEREZ, Cristian. Elaboración de adoquines de concreto, empleando cenizas de biosólido como material sustituyente de materia prima. Tunja. 2016. Trabajo de grado (Ingeniero civil). Universidad Santo Tomas. Facultad de ingeniería civil.

endurecido de las muestras experimentales. Los resultados revelaron que la trabajabilidad del concreto se redujo cuando el contenido de cenizas del fondo aumentó reemplazando a la arena. Por otro lado, a la edad de 28 días, no se observó un efecto significativo en la resistencia a la compresión, flexión y tracción de todas las muestras de concreto. Después del curado a las edades de 91 y 180 días, la resistencia a la compresión de las muestras experimentales y de concreto de control aumentó significativamente, pero se mantuvo casi similar. Sin embargo, las resistencias a la tracción a la flexión y a la separación de la mezcla experimental que contenía el 75% de ceniza de fondo y el 20% de cenizas volantes excedieron mucho más que la muestra de control. Además, la contracción por secado de mezclas experimentales de hormigón que contenían 50%, 75% y 100% de ceniza de fondo y 20% de ceniza volante fue menor que la mezcla de control. Se demuestra que esas mezclas experimentales de concreto se pueden usar en varias estructuras (cimientos, sub-bases, pavimentos, etc.) que minimizarán en gran medida el costo, la energía y los problemas ambientales.¹⁸

En la evaluación de las propiedades del concreto fresco y endurecido con incorporación de cenizas de fondo de carbón y polvo de escoria, aborda las propiedades físicas del hormigón ecológico (Ultra High Performance Concrete (UHPC)) que incorpora subproductos industriales como la ceniza de fondo de carbón, la ceniza volante y dos tipos de polvo de escoria. Se caracterizan el flujo de asentamiento, el desarrollo de la resistencia a la compresión, la porosidad, el tiempo de fraguado, la contracción autógena y el análisis termo gravimétrico de UHPC. Los resultados experimentales indican que la ceniza de fondo de carbón y las cenizas volantes son subproductos industriales prometedores al reemplazar efectivamente el polvo de sílice en UHPC sin pérdidas significativas en la trabajabilidad y el desarrollo de la resistencia. Se revela que la escoria granulada de alto horno de tamaño normal y fino puede usarse efectivamente sin activador adicional para sustituir parcialmente el cemento y el humo de sílice, respectivamente, lo que resulta en una trabajabilidad mejorada y una resistencia a la compresión comparable, aunque con un desarrollo de resistencia relativamente lento. Además, se encuentra que la adopción de varias formas de subproductos industriales en UHPC no juega un papel significativo en afectar la contracción autógena, la porosidad y la absorción de agua capilar de UHPC.¹⁹

Otra aplicación se analizó en el comportamiento mecánico a edades tardías del concreto hidráulico con adición de cenizas volantes de termopaipa. En esta

¹⁸ MAHDI, Rafieizonooz; JAHANGIR, Mirza; MOHD, Razman; MOHD, Warid; ELNAZ, Khan. Construction and Building Materials. Volume 116, 30 July 2016, Pages 15-24. [En línea] [14/07/2017] Disponible de: <<http://www.sciencedirect.com>>

¹⁹ SUKHOON, Pyo; HYEONG-Ki, Kim. Construction and Building Materials. Volume 131, 30 January 2017, Pages 459-466 [En línea] [14/07/2017] Disponible de: <<http://www.sciencedirect.com>>

investigación se realizaron pruebas físico-mecánicas y físico-químicas que permitieran determinar las propiedades de durabilidad de los materiales a investigar. Se realizó el reemplazo en diferentes proporciones (0 al 6% del peso del cemento) utilizado en la mezcla para la producción de concreto. Se determinó que la ceniza proporciona al concreto fresco una mayor manejabilidad, le proporciona una mayor velocidad de hidratación y así mismo regula la cantidad de calor de hidratación; evitando la retracción y por lo tanto, el concreto adicionado es menos susceptible a figuración. En cuanto al comportamiento mecánico a compresión de los concretos estudiados, es factible diseñar concretos adicionados con cenizas volantes de termopaipa teniendo certeza que a edades mayores a los 28 días su incremento resistente será mayor que en los concretos normales.²⁰

Estas investigaciones han contribuido al campo de la construcción y al medio ambiente disminuyendo la contaminación causada por materiales desechados y reintegrándolos a un nuevo uso, sin embargo en la mayoría de los estudios realizados, estos materiales son incinerados para convertirlos en cenizas, lo cual puede generar otro tipo de contaminación. Es por esto la importancia de seguir buscando una alternativa de reutilizar estos materiales (lodos, biosólidos) en su estado natural al incorporarlos en elementos constructivos, en este caso reemplazando parcialmente la arena por biosólido en el concreto.

4.2. MARCO TEÓRICO

4.2.1. Aguas residuales.

Las aguas residuales municipales, son una mezcla compleja que contiene agua (por lo común más de 99%) mezclada con contaminantes orgánicos e inorgánicos, tanto en suspensión como disueltos.²¹

En general, se consideran aguas residuales domésticas (ARD) los líquidos provenientes de las viviendas o residencias, edificios comerciales e institucionales. Se denominan aguas residuales municipales (ARM) los residuos líquidos transportados por el alcantarillado de una ciudad o población y tratados en una planta de tratamiento municipal; y se llaman aguas residuales industriales (ARI) las aguas residuales provenientes de las descargas de industrias de manufactura.

²⁰ CIFUENTES, Álvaro; Ferrer, Carlos. Análisis del comportamiento mecánico a edades tardías del concreto hidráulico con adición de cenizas volantes de termopaipa. Bucaramanga. 2006. Trabajo de grado (Ingeniería civil). Universidad industrial de Santander. Facultad de ingenierías físico mecánicas. Escuela de ingeniería civil.

²¹ HENRY, J. Glynn y HEINKE, Gary W. ingeniería ambiental. Ed. Pearson education. 2ed.

También se acostumbra denominar aguas negras a las residuales provenientes de inodoros, es decir, aquellas que transportan excrementos humanos y orina, ricas en sólidos suspendidos, nitrógeno y coliformes fecales. Y aguas grises a las aguas residuales provenientes de tinajas, duchas, lavamanos y lavadoras, aportantes de demanda bioquímica de oxígeno (DBO), sólidos suspendidos (SS), fósforo, grasas y coliformes fecales.²²

4.2.2. Tratamiento de aguas.

El objetivo básico del tratamiento de las aguas es proteger la salud y promover el bienestar de la sociedad en general. El retorno de las aguas residuales (AR) a ríos o lagos convierte a la sociedad en usuarios directos o indirectos, es por esto que se aumenta la necesidad de proveer sistemas de tratamiento o renovación que permitan eliminar los riesgos para la salud y minimizar los daños al ambiente.²³

El tratamiento primario contempla el uso de operaciones físicas tales como la sedimentación y el desbaste para la eliminación de los sólidos sedimentables y flotantes presentes en el agua residual. En el tratamiento secundario son procesos biológicos y químicos los que emplean para eliminar la mayor parte de la materia orgánica. En el tratamiento terciario se emplean combinaciones adicionales de los procesos y operaciones unitarias con el fin de eliminar otros componentes.²⁴

4.2.3. Tratamiento de lodos.

El lodo proveniente de la sedimentación y de los procesos de tratamiento biológico debe estabilizarse o tratarse antes de disponer de él o reutilizarlos. La necesidad de la estabilización o del tratamiento depende del tipo de disposición o reutilización y de las molestias potenciales debidas a los olores en el lugar. El lodo se procesa para: 1) eliminar los olores desagradables, 2) reducir o inhibir la putrefacción potencial y 3) reducir el contenido de organismos patógenos.

Las formas para el tratamiento de lodos incluyen: 1) la reducción biológica de los sólidos volátiles biodegradables, 2) la oxidación química de los sólidos volátiles, 3)

²² ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. Tratamiento de aguas residuales. teoría y principios de diseño. Ed. Escuela colombiana de ingenieros.(2004).

²³ ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. Tratamiento de aguas residuales. teoría y principios de diseño. Ed. Escuela colombiana de ingenieros. (2004).

²⁴ METCALF & EDDY. Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento vertido y reutilización. Ed. Mc Graw Hill.3ed.vol.1.

la adición de sustancias químicas para volver el lodo no biodegradable. Y 4) calentamiento para desinfectar o esterilizar el lodo.²⁵

4.2.4. Biosólidos.

En el proceso de tratamiento de aguas residuales urbanas o asimilables, se obtienen como subproductos el material retenido en los dispositivos de desbaste (comparable a residuos sólidos urbanos), arenas, grasas y biosólidos (conocidos también como fangos o lodos de depuración), siendo estos últimos los que suponen la mayor parte del volumen y presentan importantes problemas de tratamiento y evacuación.

Los biosólidos se obtienen por separación de la fase líquida en dos etapas del proceso de depuración convencional:

- En la cadena de decantación primaria, por gravedad se separan parte de las partículas que lleva en suspensión el agua residual a la entrada de la planta.
- En la decantación secundaria se separan de efluente los flóculos de microorganismos formados a partir del licor de mezcla existente en el reactor biológico. Una parte se recircula al citado reactor para mantener la biomasa necesaria y el resto se extrae, constituyendo los lodos secundarios.²⁶

La EPA define a los biosólidos como “residuos sólidos, semisólidos o líquidos generados durante el tratamiento de aguas servidas domiciliarias. Los biosólidos incluyen las escorias o sólidos removidos durante el tratamiento primario, secundario o avanzado del proceso de tratamiento de aguas servidas y cualquier material derivado de los lodos, excepto las gravillas o cenizas generadas durante el proceso de incineración”.²⁷

4.2.4.1. Características de los biosólidos.

Dentro de las características más importantes de los biosólidos se encuentran:

²⁵ CRITES, Ron; TCHOBANOGLIOUS, George. tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones .Mc Graw Hill.

²⁶ MAHAMUD LÓPEZ, Manuel; GUTIÉRREZ LAVÍN, Antonio y SASTRE ANDRÉS, Herminio. biosólidos generados en la depuración de aguas (i): planteamiento del problema. Ingeniería del Agua. Vol. 3 Núm. 2 (1996) p.47-62

²⁷ EPA. (194) A Plain English Guide to the USEPA Part 503 Biosolids Rule.

➤ **Nutrientes.** La concentración de los nutrientes en los biosólidos es muy variable dependiendo del tipo de efluente y tratamiento a los cuales sean sometidos.

Nitrógeno: en el biosólido este nutriente se encuentra en forma nítrica (NNO_3), amoniacal (N-NH_4) y orgánica siendo ésta última la más abundante.

Fósforo: Las formas en que se halla el fósforo (P) en el biosólido, dependen de la composición de éste antes de ser tratado y de los procesos a que se halla sometido durante su estabilización, de esta forma se pueden encontrar compuestos orgánicos e inorgánicos, solubles e insolubles.

Potasio: El contenido de potasio (K) en los biosólidos es bajo comparado con el resto de nutrientes.

➤ **Microorganismos.** Los biosólidos son principalmente biomasa residual, la cual está constituida por una heterogénea y significativa población de microorganismos como bacterias, virus, protozoos y huevos de helmintos, los que se concentran durante el proceso de depuración de las aguas servidas. Sin embargo, el número y tipos de estos organismos varían dependiendo de factores como densidad de población, condiciones sanitarias y tratamientos a los que son sometidos. Algunos de estos tratamientos como digestión aerobia, digestión anaerobia y aireación, reducen significativamente más no eliminan completamente los patógenos. Entre las bacterias patógenas que pueden estar presentes en los biosólidos se encuentran, por ejemplo, las *Salmonellas Typhi* (que produce fiebre tifoidea), *Escherichia coli* (que produce gastroenteritis), *Shigellas* (que produce disenteria), las *Vibrio Cholerae* (que producen diarreas extremadamente fuertes o cólera), etc. Entre los protozoos se encuentran la *Cryptosporidium* y la *Balantidium Coli* (que producen diarrea) y también se pueden encontrar tenias y lombrices intestinales. Entre los virus encontrados en los biosólidos frescos están además, el de la hepatitis A y el de la poliomielitis. Los rotavirus y adenovirus pueden causar infecciones respiratorias y gastrointestinales.

➤ **Metales pesados.** Están presentes en los biosólidos en cantidades importantes, su procedencia es diversa: doméstica, industrial y comercial.

Es posible encontrar metales como boro, cadmio, cromo, plomo, níquel, mercurio, plata y zinc. Algunos de estos elementos son micronutrientes esenciales requeridos por plantas y animales lo cuales a bajas concentraciones constituyen un aporte nutritivo al suelo, sin embargo, a altas concentraciones pueden ser tóxicos.

La mayoría de los metales se acumulan en la tierra (pudiendo permanecer allí por cientos de años) y las plantas los toman de ella a través de sus raíces. El uso de ciertos productos puede terminar en el aumento de pH de los lodos lo que es deseable muchas veces ya que esta característica se asocia con la disminución de

fitodisponibilidad de metales pesados. Existe la posibilidad de que los niveles acumulados sean tan altos que constituyan un peligro para la salud de los animales y personas lo cual puede generar problemas en la cadena trófica, enfermedades y probablemente la muerte de seres vivos.

➤ **Contaminantes orgánicos.** Los biosólidos pueden contener compuestos orgánicos volátiles (VOC's) como ciclohexano, octano, cloroformo, tetracloroetileno, benceno, xilenos y toluenos. También se encuentran compuestos como hidrocarburos aromáticos (PAH's) y fenoles, además muy altas concentraciones de surfactantes debidos a los detergentes.

4.2.4.2. Clasificación de los biosólidos.

De acuerdo a la norma 40 CFR Part 503 de la EPA²⁸, los biosólidos se clasifican según el contenido de patógenos y el nivel de metales pesados en Clase A o Clase B.

➤ **Biosólido Clase A:** es aquel sometido a diferentes procesos, con el objetivo de reducir la carga de patógenos por debajo de los límites que signifiquen riesgo para la salud de las personas que tienen contacto con ellos. Este suele llamarse de “calidad excepcional”, donde la densidad presentada en los coliformes fecales debe ser menor a 1000 NMP (número más probable) g de solido total o también la densidad de Salmonella sp. Es menor a 3 NMP /4g de solido total; los virus entéricos deben tener una densidad de menor o igual a 1UFC (Unidad formadora de colonia) /4g de solido total y los huevos viables de helmintos deben ser menor a 1/ 4g de solido total. Estos biosólidos no tienen ninguna restricción para su aplicación en cultivos agrícola y solo es necesario solicitar permiso para avalar la norma.

Biosólido Clase B: es aquel que a pesar de tener una reducción significativa de microorganismos patógenos, no los elimina completamente. Este debe tener una densidad de coliformes fecales inferior a 2 x NMP/ gramo de solido total.

Esta clase de biosólido debe tener un tratamiento posterior para su estabilización; y son los de mayor restricción para uso en suelos.

²⁸ EPA. (194) A Plain English Guide to the USEPA Part 503 Biosolids Rule.

Tabla 1. Valores límites por la EPA Norma CFR 40 parte 503 para biosólidos

Constituyentes	Concentración máxima (mg/kg)	Calidad microbiológica Tipo A*	Calidad microbiológica Tipo B**
Arsénico	75		
Cadmio	85		
Cobre	4300		
Plomo	840		
Mercurio	57		
Molibdeno	75		
Níquel	420		
Selenio	100		
Zinc	7500		
Microbiológico			
Coliformes fecales (UFC/g)		< 10 ³	< 2x10 ⁶
<i>Salmonella</i> sp (UFC/g)		3/4	-
Huevos de helmintos/g		1/4	-

Fuente: EPA. (1994) A Plain English Guide to the USEPA Part 503 Biosolids Rule

4.2.4.3. Alternativas de aprovechamiento de biosólidos²⁹

En el mundo se da prelación al aprovechamiento benéfico de biosólidos. La disposición o la incineración deben ser las últimas opciones a contemplar. Sin embargo, en algunos países o zonas se convierte en la única posibilidad ante la ausencia de terrenos para el aprovechamiento.

La gestión de biosólidos debe contemplar la mayor cantidad de opciones de aprovechamiento en caso de que el lugar de recepción se colme o no requiera más material.

Las alternativas de aprovechamiento de biosólidos son las siguientes:

- Agrícola y pecuario
- Silvicultura (plantaciones forestales, viveros)
- Recuperación de suelos degradados
- Adecuación de zonas verdes (separadores viales, parques)
- Elaboración de abonos y enmiendas
- Cobertura intermedia o final de rellenos sanitarios
- Biorremediación de suelos contaminados
- Elaboración de materiales de construcción

²⁹ DÁGUER, Gian Paolo. Gestión de biosólidos en Colombia. En: Revista ACODAI, Noviembre 2003, Vol. 202. [En línea] [02/11/2017] Disponible en :< <http://www.geocities.com/ptarcolombia/gestion.htm> >.

4.2.4.4. Aprovechamiento del biosólido PTAR el Salitre. ³⁰

La deshidratación de los lodos digeridos permite una producción media mensual de biosólido en la PTAR Salitre de 4500 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.

4.2.5. Materias primas para la elaboración de concreto

4.2.5.1. Cemento.

➤ Definición

El cemento es el principal ingrediente en la fabricación de concreto. El cemento es el material de construcción más utilizado en el mundo. Aporta propiedades útiles y deseables, tales como resistencia a la compresión, durabilidad y estética para una diversidad de aplicaciones de construcción.

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.³¹

Es un material pulverizado que además de óxido de calcio contiene sílice alúmina y óxido de hierro y que forma, por adición de una cantidad apropiada de agua, una

³⁰ Tratamiento de aguas y lodos PTAR Salitre. (s.f.). Acueducto agua y alcantarillado de Bogotá. [En línea]. [04/11/2017]. Disponible en: <<http://www.acueducto.com.co>>

³¹ CEMEX. cemento. 2017. [En línea]. [04/11/2017]. Disponible en: <<http://archive.cemex.com/ES/ProductosServicios/Cemento.aspx>>

pasta conglomerante capaz de endurecer tanto en el agua como en el aire. Se excluyen las cales hidráulicas, las cales aéreas y los yesos.³²

- **Cemento Portland:** Producto que se obtiene por la pulverización del Clinker pórtland con la adición de una o más formas de sulfato de calcio. Se admite la adición de otros productos siempre que su inclusión no afecte las propiedades del cemento resultante. Todos los productos adicionales deben ser pulverizados conjuntamente con el Clinker.³³
- **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.

³² INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Ingeniería civil y arquitectura. Cemento. Definiciones. NTC 31. Bogotá D.C.: ICONTEC, 1982.

³³ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Ingeniería civil y arquitectura. Cemento. Definiciones. NTC 31. Bogotá D.C.: ICONTEC, 1982.

➤ **Clasificación Cemento Portland**

Tabla 2. Clasificación cemento portland

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

Fuente: FERNÁNDEZ, Rosalba. Materiales estructurales en las construcciones civiles. (1989). CEMENTO PORTLAND.

➤ **TIPOS DE CEMENTO PORTLAND EN COLOMBIA.**

Tabla 3. Tipos De Cemento Portland En Colombia

Cemento Portland	Características de los cementos
Tipo UG	Cemento hidráulico para construcción general. Utilícese cuando uno o más de los tipos especiales no sean requeridos.
Tipo ART	Alta Resistencia Temprana
Tipo MRS	Alta Resistencia Temprana
Tipo ARS	Alta Resistencia a los Sulfatos
Tipo MCH	Moderado Calor de Hidratación
Tipo BCH	Bajo Calor de Hidratación

Fuente: INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Especificación de desempeño para cemento hidráulico. NTC 121. Bogotá D.C.: ICONTEC, 2014.

4.2.5.2. AGREGADOS³⁴

➤ Agregados Fino

El agregado fino debe estar compuesto de arena natural, arena triturada o una combinación de éstas.

- **Análisis granulométrico.**

El agregado fino debe estar clasificado dentro de los siguientes límites:

Tabla 4. Clasificación del agregado fino.

Tamiz NTC 32 (ASTM E 11)	Porcentaje que pasa
9,5 mm	100
4,75 mm	95 a 100
2,36 mm	80 a 100
1,18 mm	50 a 85
600 µm	25 a 60
300 µm	10 a 30
150 µm	2 a 10

Fuente: INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Concretos. Especificaciones de los agregados para concreto. NTC 174. Bogotá D.C.: ICONTEC, 2000.

➤ Agregado Grueso

El agregado grueso debe estar compuesto de grava, grava triturada, roca triturada, escoria de alto horno enfriada al aire, o concreto triturado fabricado con cemento hidráulico o una combinación de ellos.

- **Gradación**

El agregado grueso debe cumplir con los requisitos establecidos en la Tabla 5 para el número de tamaño especificado.

³⁴ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Concretos. Especificaciones de los agregados para concreto. NTC 174. Bogotá D.C.: ICONTEC, 2000.

Tabla 5. Requisitos de gradación para agregado grueso.

Número del tamaño del agregado	Tamaño nominal (tamices de abertura cuadrada)	Material que pasa uno de los siguientes tamices (porcentaje en masa)												
		100 mm	90 mm	75 mm	63 mm	50 mm	37,5 mm	25,0 mm	19,0 mm	12,5 mm	9,5 mm	4,75 mm (No.4)	2,36 mm (No.8)	1,18 mm (No.16)
1	90 mm a 37,5 mm	100	90-100	-	25-60	-	0-15	-	0-5	-	-	-	-	-
2	63 mm a 37,5 mm	-	-	100	90-100	35-70	0-15	-	0-5	-	-	-	-	-
3	50 mm a 25,0 mm	-	-	-	100	90-100	0-15	-	-	0-5	-	-	-	-
357	50 mm a 4,75 mm (No.4)	-	-	-	100	95-100	35-70	-	-	10-30	-	0-5	-	-
4	37,5 mm a 19,0 mm	-	-	-	-	100	90-100	20-55	0-15	-	0-5	-	-	-
467	37,5 mm a 4,75 mm (No.4)	-	-	-	-	100	95-100	-	35-70	-	10-30	0-5	-	-
5	25,0 mm a 12,5 mm	-	-	-	-	-	100	90-100	20-55	0-10	0-5	-	-	-
56	25,0 mm a 9,5 mm	-	-	-	-	-	100	90-100	40-85	10-40	0-15	0-5	-	-
57	25,0 mm a 4,75 mm (No.4)	-	-	-	-	-	100	95-100	-	25-60	-	0-10	0-5	-
6	19,0 mm a 9,5 mm	-	-	-	-	-	-	100	90-100	20-55	0-15	0-5	-	-
67	19,0 mm a 4,75 mm (No.4)	-	-	-	-	-	-	100	90-100	-	20-55	0-10	0-5	-
7	12,5 mm a 4,75 mm (No.4)	-	-	-	-	-	-	-	100	90-100	40-70	0-15	0-5	-
8	9,5 mm a 2,36 mm (No.8)	-	-	-	-	-	-	-	-	85-100	10-30	0-10	0-5	0-5

Fuente: INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Concretos. Especificaciones de los agregados para concreto. NTC 174. Bogotá D.C.: ICONTEC, 2000.

4.2.5.3. AGUA

➤ 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.³⁵

➤ AGUA DE MEZCLA³⁶

El agua de mezcla cumple dos funciones muy importantes, permitir la hidratación del cemento y hacer la mezcla manejable. De toda el agua que se emplea en la preparación de un mortero o un concreto, parte hidrata el cemento, el resto no presenta ninguna alteración y con el tiempo se evapora; como ocupaba un espacio dentro de la mezcla, al evaporarse dejan vacíos los cuales disminuyen la resistencia y la durabilidad del mortero o del hormigón. La cantidad de agua que requiere el cemento para su hidratación se encuentra alrededor del 25% al 30% de

³⁵ OSORIO, J. D. (2010). Hidratación del concreto: Agua de curado y Agua de mezclado. 360 ° en concreto, 1-3.

³⁶ RIVERA, Gerardo. Agua de mezcla. Concreto simple. Capítulo 3. [En línea]. [15/11/2017]. Disponible en: <ftp://ftp.unicauca.edu.co/cuentas/geanrilo/docs/FIC%20y%20GEOTEC%20SEM%20%20de%202010/Tecnologia%20del%20Concreto%20-%20%20PDF%20ver.%20%202009/Cap.%2003%20-%20Agua%20de%20mezcla.pdf>

la masa del cemento, pero con esta cantidad de mezcla no es manejable, para que la mezcla empiece a dejarse trabajar, se requiere como mínimo una cantidad de agua de orden del 40% de la masa del cemento, por lo tanto, de acuerdo con lo anterior como una regla práctica, se debe colocar la menor cantidad de agua en la mezcla, pero teniendo en cuenta que el hormigón o mortero queden trabajables.

Como norma general se considera que el agua es adecuada para producir mortero u hormigón si su composición química indica que es apta para el consumo humano, sin importar si ha tenido un tratamiento preliminar o no; es decir, casi cualquier agua natural que pueda beberse y que no tenga sabor u olor notable sirve para mezclar el mortero o el concreto. Sin embargo, el agua que sirve para preparar estas mezclas, puede no servir para beberla.

➤ **AGUA DE CURADO.** ³⁷

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 construidos para que alcancen el desempeño deseado.

³⁷ OSORIO, J. D. (2010). Hidratación del concreto: Agua de curado y Agua de mezclado. 360 ° en concreto, 1-3.

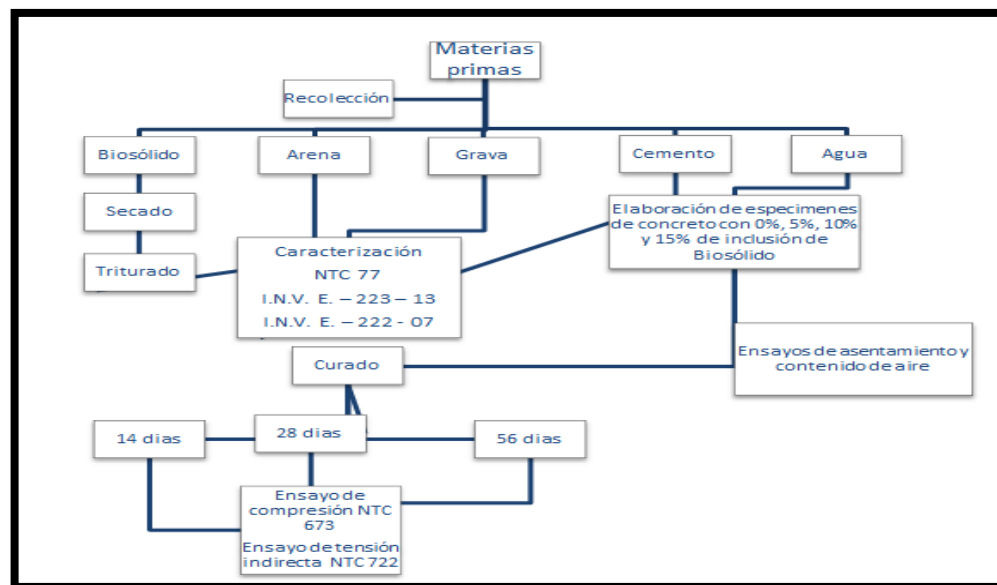
5. METODOLOGIA

La metodología propuesta tiene como fin la determinación de las propiedades físicas y mecánicas del concreto modificado con sustitución parcial de Biosólido planteando los niveles de sustitución en volumen del agregado fino, los cuales se fijaron en porcentajes de 5, 10 y 15%, a través de ensayos de compresión, tracción, asentamiento, contenido de aire y ensayos de caracterización de las materias primas conforme a las normas NTC 77, 396, 673, 722, 1032. Los ensayos fueron realizados en el laboratorio de la Universidad Santo Tomás seccional Tunja ubicada en la Av. Universitaria Calle. 48 No. 1-235 este.

Recolectados y Caracterizados los materiales (arena, grava y Biosólido) se determinaron las proporciones mediante diseños de mezcla y se elaboraron los especímenes con las diferentes proporciones. Se realizaron en total 4 tipos de mezclas, la primera sin sustitución de agregado fino, que serviría como muestra de referencia para las otras 3, las cuales tendrían sustitución parcial de agregado fino por Biosólido seco a temperatura ambiente realizando ensayos a 14, 28, 56 días; el curado de los especímenes se realizó bajo inmersión en agua.

Finalmente a cada uno de los especímenes se le analizó el comportamiento que presentó al ser sometido a la prueba de carga; los datos arrojados son comparados y analizados teniendo en cuenta los especímenes sin sustitución de agregado fino.

Figura 1. Metodología



Fuente: Autor

5.1. TIPO DE MÉTODO

El estudio denominado elaboración de mezclas de concreto con inclusión de biosólido procedente del tratamiento de aguas residuales desarrollo un método de análisis en el cual se identificaron y analizaron cada una de las partes del estudio (Biosólido, concreto) mediante un enfoque cuantitativo que permite tener el control de los procedimientos y resultados llevados a cabo permitiendo la réplica de los ensayos. Las conclusiones y recomendaciones propuestas en el documento, fueron determinadas por los resultados numéricos basados en principios teóricos y académicos.

Los especímenes de concreto fueron contruidos y sometidos a cargas mediante la implementación de la máquina de compresión y tracción, la cual permite medir la resistencia y observar los tipos de falla generados por cargas impuestas.

5.2. RECOLECCIÓN DEL BIOSÓLIDO

El biosólido con el que se realizó la investigación fue suministrado por la planta de tratamiento de aguas residuales de la ciudad de Bogotá D.C. - PTAR EL SALITRE; en donde se generan aproximadamente 4500 Toneladas al mes de este tipo de residuo.

Figura 2. Ubicación PTAR El salitre- Bogotá



Fuente: Google earth

Para la recolección de los 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.)³⁸

5.2.1. Revisión del lugar para muestreo.

Se realizó una visita a las instalaciones de la PTAR El salitre para determinar cuál era la posición más segura y más práctica para la realización de un muestreo manual. De lo cual se pudo establecer que el mejor lugar para realizar el muestreo era en las bandas transportadoras al final del proceso de tratamiento al que son sometidos los lodos producto de la depuración de las aguas residuales.

5.2.2. Muestreo, almacenamiento, manipulación y secado del biosólido.

El proceso de recolección de la muestra se realizó de forma manual y se llevó a cabo en una sección de las bandas transportadoras; la pala o elemento recolector se insertó de manera alterna al paso del biosólido y se aseguró que la muestra incluyera todo el ancho de la banda transportadora. Se usaron elementos de plástico (recipiente recolector) y una pala para evitar la contaminación de la muestra por el material de los equipos de muestreo. La muestra fue recolectada en bolsas de polietileno, selladas herméticamente entre lonas con el fin de evitar escapes.

El material biosólido fue conducido hasta el municipio de Sogamoso (Boyacá) en donde se realizó el secado a temperatura ambiente durante 25 días; el cual se redujo hasta un 50% su masa total; por lo cual para este proyecto fue necesario transportar más del doble del material calculado para realizarlo. El secado del biosólido se realizó a temperatura ambiente siendo un método funcional evitando el uso de hornos que aumentan el índice de contaminación del medio ambiente.

³⁸ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. Gestión ambiental. Calidad de agua. Parte 13: Guía para el muestreo de lodos de aguas residuales y plantas de tratamiento de aguas. NTC - ISO 5667-13. Bogotá D.C.: El instituto, 1998. 21 p.

Figura 3. Muestreo



Fuente: Autor

Figura 4. Almacenamiento y manipulación



Fuente: Autor

Figura 5. Secado



Fuente: Autor

5.3. CARACTERIZACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS

La caracterización de las materias primas para la fabricación de concreto con inclusión de biosólido se realizó teniendo en cuenta los siguientes ensayos:

Tabla 6. Ensayos a realizar, materias primas.

MATERIAL	ENSAYO
Grava	NTC 77 "Método De Ensayo Para El Análisis Por Tamizado De Los Agregados Finos Y Gruesos". I.N.V. E. – 223 – 13 Gravedad específica y absorción de agregados Contenido de humedad
Arena	NTC 77 "Método De Ensayo Para El Análisis Por Tamizado De Los Agregados Finos Y Gruesos". I.N.V.E. – 222 – 07 Gravedad específica y absorción de agregados Contenido de humedad
Biosólido	Se realiza un ensayo de tamizado según la granulometría de la arena a reemplazar.

Fuente: Autor

5.3.1. GRAVA

5.3.1.1. Granulometría.

Teniendo en cuenta la norma NTC 77 "MÉTODO DE ENSAYO PARA EL ANÁLISIS POR TAMIZADO DE LOS AGREGADOS FINOS Y GRUESOS". La cual tiene por objeto la determinación de la distribución de los tamaños de las partículas que componen los agregados finos y gruesos, a través de un proceso de tamizado. Para el proceso se dispuso de una serie adecuada de tamices 3", 2 1/2", 2", 1 1/2", 1", 1/2", 3/8", 1/4", N°4, N°8. La cantidad de muestra usada es de 3 kg.

Figura 6. Tamices seleccionados



Fuente: Autor

5.3.1.2. Gravedad específica.

Teniendo en cuenta la norma I.N.V.E – 223 – 13 GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DE AGREGADOS GRUESOS la cual determina 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 7. Prueba de absorción de agua de la grava



Fuente: Autor

5.3.1.3. 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.

Figura 8. Prueba de humedad de muestras.



Fuente: Autor

5.3.2. ARENA

5.3.2.1. Granulometría.

Teniendo en cuenta la norma NTC 77 "MÉTODO DE ENSAYO PARA EL ANÁLISIS POR TAMIZADO DE LOS AGREGADOS FINOS Y GRUESOS". La cual tiene por objeto la determinación de la distribución de los tamaños de las partículas que componen los agregados finos y gruesos, a través de un proceso de tamizado. Para el proceso se dispuso de una serie adecuada de tamices (3/8", N° 4, N°8, N°16, N°30, N°50, N°100.) La cantidad de muestra usada es de 1,5 kg.

Figura 9. Tamices seleccionados



Fuente: Autor

5.3.2.2. Gravedad Específica.

Teniendo en cuenta la norma I.N.V. E. – 222 – 07 GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DE AGREGADOS la cual determina la densidad promedio de una cantidad de partículas de agregado fino (sin incluir los vacíos entre ellas), la densidad relativa (gravedad específica) y la absorción del agregado fino.

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, una vez retiradas del agua, las partículas del agregado se secan superficialmente y se determina su masa. Luego la muestra 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.

Figura 10. Prueba de absorción y densidad arena



Fuente: Autor

5.3.2.3. Contenido 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.

Figura 11. Prueba de humedad de muestras.



Fuente: Autor

5.3.3. BIOSÓLIDO

5.3.3.1. Granulometría.

Teniendo en cuenta la norma NTC 77 "MÉTODO DE ENSAYO PARA EL ANÁLISIS POR TAMIZADO DE LOS AGREGADOS FINOS Y GRUESOS". La cual tiene por objeto la determinación de la distribución de los tamaños de las partículas que componen los agregados finos y gruesos, a través de un proceso de tamizado; el biosólido empleado para la elaboración de las mezclas fue pasado por el tamiz N° 40 siendo este un material fino. En este ensayo se utilizaron 1.5 kg de biosólido.

Figura 12. Muestra biosólido



Fuente: Autor

Figura 13. Tamizado Biosólido



Fuente: Autor

5.4. ESPECIFICACIONES EN LA ELABORACIÓN DE LOS ESPECÍMENES

Para la elaboración de los especímenes de concreto, se tuvo en cuenta la Norma NTC 550. Además se tuvo en cuenta para el diseño de mezcla el libro Tecnología del Mortero y del Concreto.

5.4.1. Dimensiones de los especímenes

La NTC 1377 recomienda las siguientes dimensiones:

- ✚ Diámetro: 15 cm
- ✚ Altura: 30 cm

5.4.2. Numero de especímenes

La NTC 550 recomienda para obtener datos verídicos tener como mínimo 3 y máximo 5 especímenes para realizar las pruebas. De 3 a 5 para realizar la prueba de compresión, de 3 a 5 para realizar la prueba de tracción indirecta. Se tiene en cuenta dos variables definidas, la primera: el porcentaje de biosólidos a incluir en la mezcla (5%, 10%, 15%), la segunda: los días a realizar las fallas (14, 28 y 56 días).

El número total de especímenes fabricados es de 90 especímenes distribuidos en los distintos días de falla, 6 por cada mezcla los cuales se fallaron 3 a compresión y 3 a tensión como se muestra a continuación en la tabla 7.

Tabla 7. Ensayos a realizar, materias primas

Días	% DE BIOSÓLIDO			
	0%	5%	10%	15%
14	6	6	6	6
28	6	6	6	6
56	6	6	6	6

Fuente: Autor

5.5. PROPORCIONES Y MEZCLAS DE LOS AGREGADOS.

Las mezclas que se muestran a continuación en las siguientes tablas 8, 9, 10, 11 se basan teniendo en cuenta la cantidad de biosólidos a incorporar (0%, 5%, 10% y 15%).

Tabla 8. Proporciones de mezcla base 0%

Mezcla base 0% de biosólido				
Para 1m3			Para 18 cilindros	
Materiales	Peso seco kg/m3	Peso húmedo Kg/m3	Peso seco kg/m3	Peso húmedo Kg/m3
Cemento	501	501	93	17
Agua	203	184,0	38	7
Contenido de aire	-	-		
Agregado grueso	584	585	108	20
Agregado fino	301	322	56	10

Fuente: Autor.

En esta tabla se puede observar la cantidad de materiales necesarios para la elaboración de 1m³ de concreto, tomando este como base se realiza el cálculo para la elaboración de 18 especímenes de concreto.

Tabla 9. Proporciones de mezcla por incorporación del 5% Biosólido

Mezcla con 5% de biosólido				
Para 1m ³			Para 18 cilindros	
Materiales	Peso seco kg/m ³	Peso húmedo Kg/m ³	Peso seco kg/m ³	Peso húmedo Kg/m ³
Cemento	501	501	93	17
Agua	203	184,0	38	7
Contenido de aire	-	-		
Agregado grueso	584	585	108	20
Agregado fino	301	322	56	10
Biosólido	15		3	

Fuente: Autor.

En esta tabla se puede observar la cantidad de materiales necesarios para la elaboración de 1m³ de concreto, tomando este como base se realiza el cálculo para la elaboración de 18 especímenes de concreto.

Tabla 10. Proporciones de mezcla por incorporación del 10% Biosólido

Mezcla con 10% de biosólido				
Para 1m ³			Para 18 cilindros	
Materiales	Peso seco kg/m ³	Peso húmedo Kg/m ³	Peso seco kg/m ³	Peso húmedo Kg/m ³
Cemento	501	501	93	17
Agua	203	184,0	38	7
Contenido de aire	-	-		
Agregado grueso	584	585	108	20
Agregado fino	301	322	56	10
Biosólido	30		6	

Fuente: Autor.

En esta tabla se puede observar la cantidad de materiales necesarios para la elaboración de 1m³ de concreto, tomando este como base se realiza el cálculo para la elaboración de 18 especímenes de concreto.

Tabla 11. Proporciones de mezcla por incorporación del 15% Biosólido

Mezcla con 15% de biosólido				
Para 1m ³			Para 18 cilindros	
Materiales	Peso seco kg/m ³	Peso húmedo Kg/m ³	Peso seco kg/m ³	Peso húmedo Kg/m ³
Cemento	501	501	93	17
Agua	203	184,0	38	7
Contenido de aire	-	-		
Agregado grueso	584	585	108	20
Agregado fino	301	322	56	10
Biosólido	45		8	

Fuente: Autor.

En esta tabla se puede observar la cantidad de materiales necesarios para la elaboración de 1m³ de concreto, tomando este como base se realiza el cálculo para la elaboración de 18 especímenes de concreto.

Para garantizar que cada espécimen según su porcentaje de inclusión de biosólido 0%, 5%, 10% y 15% tengan cantidades adecuadas de biosólido se realizaron mezclas separadas para cada porcentaje de sustitución como se muestra en las anteriores tablas.

5.6. PROCESO DE ELABORACIÓN DE LOS ESPECÍMENES

5.6.1. Mezclado.

Para el proceso de mezclado se pesó la cantidad de material (agua, arena, grava, cemento y biosólido) necesario para cada mezcla.

Figura 14. Pesaje de materias primas para la elaboración de los especímenes de concreto



Fuente: Autor

5.6.2. Procedimiento de mezclado.

Este paso es el más importante del proceso ya que de este dependían los resultados esperados; por eso se realizó de la siguiente manera:

- El primer paso, consistió en pesar las cantidades de cada uno de los agregados necesarios para cada mezcla según correspondía la dosificación como se puede observar en la figura 14.
- El segundo paso, consistió en mezclar los diferentes agregados arena + grava + cemento + biosólido en las mezclas que tienen, por último se agrega el agua como se observa en la figura 15.

Figura 15. Mezcla de Arena, Grava, Cemento y Biosólido



Fuente: Autor.

5.6.3. Elaboración de los especímenes:

- La elaboración de los especímenes se hizo de acuerdo a la norma NTC 550 la cual da los procedimientos para la elaboración y curado de especímenes cilíndricos.

Figura 16. Elaboración de especímenes



Fuente: Autor.

- Luego de tener los especímenes hechos se dejan 24 horas en las camisas y luego de transcurrido este tiempo se realiza el desmolde de estos para ser llevados a la piscina donde serán curados.

Figura 17. Secado de los especímenes de concreto con inclusión de Biosólido



Fuente: Autor

5.6.4. Marcado de los especímenes de concreto.

Teniendo en cuenta que se realizaron diferentes cantidades de especímenes por cada mezcla, distribuidos en las tres fechas de curados o periodos de falla (14, 28 y 56 días). El porcentaje de inclusión de biosólido 0%, 5%, 10% y 15% se realizó un marcado de acuerdo a las características descritas.

A medida que se van elaborando los especímenes se van marcando con pintura blanca según corresponde a la mezcla y al porcentaje de biosólido que contiene.

Tabla 12. Codificación seleccionada para el marcado de los especímenes

M0	M1	M2	M3
M0-1	M1-1	M2-1	M3-1
M0-2	M1-2	M2-2	M3-2
M0-3	M1-3	M2-3	M3-3
M0-4	M1-4	M2-4	M3-4
M0-5	M1-5	M2-5	M3-5
M0-6	M1-6	M2-6	M3-6
M0-7	M1-7	M2-7	M3-7
M0-8	M1-8	M2-8	M3-8
M0-9	M1-9	M2-9	M3-9
M0-10	M1-10	M2-10	M3-10
M0-11	M1-11	M2-11	M3-11
M0-12	M1-12	M2-12	M3-12
M0-13	M1-13	M2-13	M3-13
M0-14	M1-14	M2-14	M3-14
M0-15	M1-15	M2-15	M3-15
M0-16	M1-16	M2-16	M3-16
M0-17	M1-17	M2-17	M3-17
M0-18	M1-18	M2-18	M3-18

M0-1:	Descripción de la codificación empleada
0, 1, 2, 3:	(%) Porcentaje de inclusión de biosólido (0=0%, 1=5%, 3=10%, 4=15%).
-1,... -18:	Número del cilindro.

Fuente: Autor.

5.6.5. CURADO DE LOS ESPECÍMENES.

De acuerdo al proceso de elaboración y a la resistencia de diseño, se realizó el curado tomando precauciones para evitar la evaporación y pérdida de agua sumergiendo los especímenes en un tanque a temperatura ambiente, hasta el momento de su falla 14, 28 y 56 días.

Figura 18. Curado de los especímenes de concreto



Fuente: Autor

5.7. ENSAYOS REALIZADOS A LAS MEZCLAS Y ESPECÍMENES DE CONCRETO

5.7.1. Ensayo para determinar el asentamiento del concreto

Este ensayo es realizado a la mezcla fresca, siguiendo los parámetros establecidos en la NTC 396 para obtener datos verídicos.

Figura 19. Ensayo de asentamiento



Fuente: Autor

5.7.2. Ensayo para la determinación del contenido de aire en el concreto fresco.

Este ensayo es realizado a la mezcla fresca, siguiendo los parámetros establecidos en la NTC 1032 para obtener datos verídicos.

Figura 20. Ensayo de contenido de aire



Fuente: Autor

5.7.3. Ensayo de resistencia a la compresión.

Los especímenes destinados para la obtención de la resistencia a la compresión deben de ser especímenes completos. Una vez evaluada las dimensiones se fallan siguiendo las indicaciones de la NTC 673 para obtener datos verídicos.

Figura 21. Ensayo de resistencia a compresión



Fuente: Autor.

5.7.4. Ensayo de resistencia a la tensión indirecta.

Los especímenes destinados para determinar la resistencia a la tensión indirecta deben de ser especímenes completos. Una vez evaluadas las dimensiones se fallan siguiendo las indicaciones de la NTC 722 para obtener los datos.

Figura 22. Ensayo de resistencia a tensión indirecta.



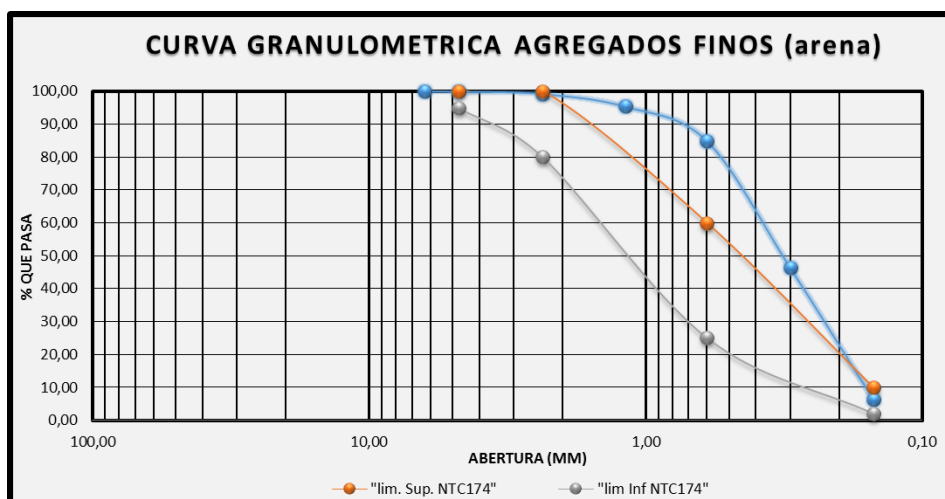
Fuente: Autor.

6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

6.1. GRANULOMETRIA DE LA ARENA

De acuerdo al ensayo granulométrico realizado a la arena, se determinó que es una arena fina de tipo SP (arenas mal graduadas, arenas con grava, pocos finos o sin finos)³⁹.

Grafica 1. Curva granulométrica de la arena



Fuente: Autor

De acuerdo a los cálculos realizados (Ver anexo 1), y la gráfica de la curva granulométrica (Gráfica 1) se puede definir que el módulo de finura de la arena es de 1,7, lo cual demuestra que es una arena fina; la granulometría que presenta la arena pertenece a una arena mal graduada y al observar en la gráfica 1 se observa que la granulometría de la arena está fuera de los límites presentes en la NTC 174.

³⁹ Universidad Católica de Valparaíso. (2008) Escuela de ingeniería en Construcción. *CLASIFICACIÓN DE SUELOS*. [En línea]. [20/12/2017] Disponible en: <http://icc.ucv.cl/geotecnia>.

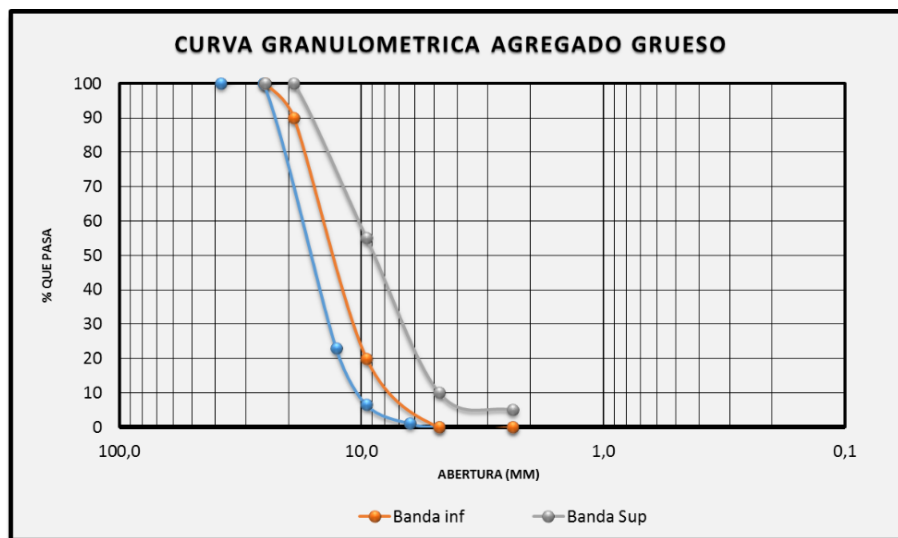
Tabla 13. Características de la arena

CARACTERISTICAS DE LA ARENA	
MASA UNITARIA SUELTA	1327,12 Kg/m ³
MASA UNITARIA COMPACTADA	1474,62 Kg/m ³
DENSIDAD APARENTE	3,41 g/cm ³
% ABSORCIÓN	0,78%
% HUMEDAD	7%
% FINOS	2,5%
FORMA	Triangular
MODULO DE FINURA	1,7

Fuente: Autor

6.2. GRANULOMETRÍA DE LA GRAVA

Grafica 2. Curva granulométrica de la grava.



Fuente: Autor

De acuerdo al ensayo granulométrico realizado a la grava, y la caracterización que se le hizo al agregado grueso "grava" (ver anexo 2) se determinó que se trata de

un material compuesto de partículas de grano mediano en su mayoría, considerado como un material de tipo GP (Gravas mal graduadas, mezcla grava-arena, pocos finos o sin finos) como se observa en la gráfica 2.⁴⁰

Tabla 14. Características de la grava

CARACTERISTICAS DE LA GRAVA	
MASA UNITARIA SUELTA	1437,59 Kg/m ³
MASA UNITARIA COMPACTADA	1568,31 Kg/m ³
DENSIDAD APARENTE	2,38 g/cm ³
% ABSORCIÓN	0,36%
% HUMEDAD	5%
% FINOS	0
FORMA	Triangular

Fuente: Autor

6.3. GRANULOMETRIA DEL BIOSÓLIDO

El biosólido que se usó para las mezclas de concreto fue secado naturalmente durante 25 días y triturado en un molino. El biosólido empleado en las mezclas paso el tamiz número 40 para obtener un grano fino y retirar el material orgánico.

Figura 23. Granulometría del biosólido



Fuente: Autor

⁴⁰ Universidad Católica de Valparaíso. (2008) Escuela de ingeniería en Construcción. *CLASIFICACIÓN DE SUELOS*. [En línea]. [20/12/2017] Disponible en: <http://icc.ucv.cl/geotecnia>.

6.4. 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.

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.

Tabla 15. Caracterización química del biosólido

VALORES MEDIOS PARA LA CONCENTRACIÓN DE ELEMENTOS POTENCIALMENTE TÓXICOS EN EL BIOSÓLIDO									
AÑO	As	Cd	Cu	Cr	Hg	Ni	Pb	Se	Zn
2005	21,27	15,39	147,25	104,96	1,58	98,27	94,28	24,66	1002,7
2006	18,48	6,66	158,08	74,69	5,12	37,64	91,23	22,46	1038,6
2007	16,02	5,88	178,28	78,53	8,82	50,55	77,58	25,93	1196,6
2008	5,5	7,97	178,59	90,4	3,38	43,29	72,72	7,07	986,72
2009	3,21	13,55	298,45	78,12	5,55	48,46	73,57	5,45	1220,2
2010	13,9	4,53	174,51	79,29	3,06	50,64	100,1	3,27	1077,4
2011	16,95	5,24	183,16	98,78	3,18	52,4	99,75	6,77	1066,4
2012	18,41	6,14	189,3	NR	4	41,83	86,12	5,64	1043,1
MEDIA	14.22	8.17	188.45	86.39	4.34	5.89	86.92	12.66	1078.96

Fuente: PTAR EL SALITRE

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 3).

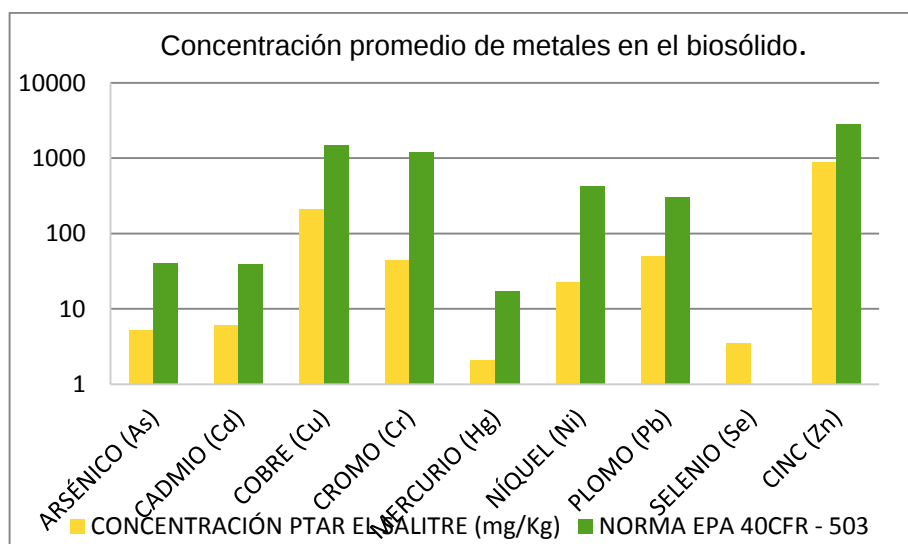
Los límites máximos permitidos se presentan por el decreto 1287 del 2010. En la tabla 16, se compara los valores máximos permisibles para el biosólido tipo B con los valores obtenidos en la caracterización química del biosólido de la PTAR EL SALITRE.

Tabla 16. Comparación con el decreto 1287 del 2010.

PARÁMETRO	CONCENTRACIÓN PTAR EL SALITRE (mg/Kg)	VALORES MÁXIMOS PERMISIBLES BIOSÓLIDO TIPO B DECRETO 1287 DEL 2010 (mg/Kg)
ARSÉNICO (As)	5,21	40
CADMIO (Cd)	6,13	40
COBRE (Cu)	212	1750
CROMO (Cr)	44,1	1500
MERCURIO (Hg)	2,05	20
NÍQUEL (Ni)	22,7	420
PLOMO (Pb)	49,2	400
SELENIO (Se)	3,57	100
CINC (Zn)	890	2800

Fuente: Modificada

Grafica 3. Concentración promedio de metales



Fuente: Autor

6.5. ANÁLISIS MEDICIÓN Y APARIENCIA DE LOS ESPECÍMENES DE CONCRETO.

6.5.1. Mediciones

Las mediciones del diámetro y altura realizadas a los especímenes de concreto no varían representativamente, respecto a la cantidad de Biosólido incorporado en los especímenes, ni al tiempo de curado de estos. Como se puede observar en la tabla 17, el promedio de medidas de los especímenes que incluyen el 5%, 10% y 15% con respecto a los convencionales con el 0% de biosólido.

La medida en peso disminuye a mayor cantidad de biosólido incorporado, debido a que el contenido de aire aumenta generando este un concreto más ligero.

Tabla 17. Promedio de medidas de los especímenes según cantidad de biosólido incorporado

MEZCLA	ALTURA (cm)	ANCHO (cm)	PESO (kg)
M-0	30,51	15,3	29,42
M-1	30,56	15,3	29,36
M-2	30,44	15,2	28,87
M-3	30,42	15,3	27,98

Fuente: Autor

6.5.2. Apariencia

La apariencia física de los especímenes, varía de acuerdo a la cantidad de Biosólido incorporado, esto se puede se puede identificar en la mezcla fresca y al momento de la falla, observando la textura de cada espécimen; sin embargo la manejabilidad de las mezclas no varía.

Debido al incremento en el porcentaje de Biosólido, los especímenes tienden a presentar manchas de color marrón en el interior de estos, así mismo el olor aumenta tendiendo a ser desagradable. En cuanto a su forma no presenta ningún cambio.

Figura 24. Apariencia especímenes

0% Inclusión Biosólido 5% Inclusión Biosólido



10% Inclusión Biosólido 15% Inclusión Biosólido



Fuente: Autor

6.6. ANÁLISIS ENSAYOS CON MEZCLA FRESCA

6.6.1. Contenido de aire.

El contenido de aire en porcentaje (por volumen) para el diseño de las diferentes mezclas es de 2 para un contenido de aire naturalmente atrapado. En la siguiente tabla se muestra los valores de aire naturalmente atrapado para las diferentes mezclas (M-0, M-1, M-2, M-3).

Tabla 18. Contenido de aire

MEZCLA #	CONTENIDO DE AIRE DE DISEÑO	CONTENIDO DE AIRE DE LA MEZCLA
M-0	2	2,3
M-1	2	2,7
M-2	2	3,3
M-3	2	3,2

Fuente: Autor

La mezcla base (sin inclusión de biosólido) M-0 es la que se aproxima al contenido de aire de diseño para la mezcla, aunque el contenido de aire aumenta en 0,3% respecto al contenido de aire de diseño.

La mezcla con 5% de inclusión de biosólido M-1 presenta un aumento en el contenido de aire con respecto al diseño de mezcla, esta presenta un aumento de 0,7% en comparación con la cantidad de aire de diseño.

La mezcla con 10% y 15% de inclusión de biosólido M-2 y M-3 respectivamente presentan un aumento significativo en el contenido de aire, al comparar con el contenido de aire de diseño estas mezclas aumentan en 1,2% y 1,3% respectivamente el cual es un aumento significativo de aire en el concreto, esto se debe a que son las mezclas con mayor cantidad de biosólido.

Figura 25. Ensayo de contenido de aire



Fuente: Autor

6.6.2. Asentamiento

El asentamiento de diseño para todas las mezclas (M-0, M-1, M-2, M-3) se encuentra entre 2 pulgadas (5cm) y 3 pulgadas (7,5 cm) el cual es para mezclas de consistencia media, en la tabla 19 se observa que las mezclas cumplieron el asentamiento de diseño.

Tabla 19. Asentamiento

MEZCLA #	ASENTAMIENTO DE DISEÑO (cm)	ASENTAMIENTO DE LA MEZCLA (cm)
M-0	7,5 cm	6,0
M-1	7,5 cm	7,5
M-2	7,5 cm	5,0
M-3	7,5 cm	6,0

Fuente: Autor

La mezcla M-0 con 0% de inclusión de biosólido cumple con el asentamiento mínimo para una mezcla de consistencia media.

La mezcla M-1 con 5% de inclusión de biosólido aumento el asentamiento 1,5 con respecto a la mezcla base (0% de inclusión de biosólido) siendo esta una mezcla más fluida.

La mezcla M-2 con 10% de inclusión de biosólido disminuyo el asentamiento 1,0 cm con respecto a la mezcla base (0% de inclusión de biosólido) siendo esta una mezcla menos fluida.

La mezcla M-3 con 15% de inclusión de biosólido presento el mismo asentamiento de la mezcla base.

A medida que aumenta la cantidad de biosólido presente en las mezclas se puede observar un aumento en el asentamiento de estas mezclas, a mayor cantidad de biosólido es mayor el asentamiento lo cual es bueno. Esto permite concluir que la presencia de biosólido en las mezclas hace que sean más fluidas.

Figura 26. Ensayo de asentamiento



Fuente: Autor

6.7. ANÁLISIS ENSAYOS DESTRUCTIVOS.

6.7.1. Ensayo de resistencia a compresión

Los análisis se llevaron a cabo en los respectivos días de curado 14,28 y 56; en donde 36 especímenes distribuidos en 4 clases de mezcla, así: 9 especímenes con el 0% de inclusión de Biosólido, 9 especímenes con el 5% de inclusión de Biosólido, 9 especímenes con el 10% de inclusión de Biosólido, 9 especímenes con el 15% de inclusión de Biosólido. Las pruebas se realizaron de acuerdo a los parámetros especificados en la norma NTC-673. Ejecutados en el laboratorio de la facultad de ingeniería civil de la Universidad Santo Tomas Tunja.

6.7.1.1. Falla a los 14 días.

Los especímenes fallados a los 14 días, poniendo como referencia el espécimen con 0% de inclusión de Biosólido, presentaron una resistencia baja como se muestra en la tabla 20. Los especímenes de concreto lograron un 78% de la resistencia diseñada de 34,5 Mpa.

Tabla 20. Promedio resistencia a la compresión en la falla de los 14 días

MEZCLA	PROMEDIO RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN f'_c - 14 DIAS (Mpa)
M - 0	26,80
M - 1	24,77
M - 2	21,77
M - 3	11,77

Fuente: Autor

6.7.1.2. Falla a los 28 días.

Los especímenes fallados a los 28 días, alcanzaron un 94% de la resistencia diseñada en 34,5 Mpa. Poniendo como referencia el espécimen con 0% de inclusión de Biosólido, los especímenes con 5%,10% y 15% de inclusión de biosólido presentaron una resistencia menor como se muestra en la tabla 21.

Tabla 21. Promedio resistencia a la compresión en la falla de los 28 días

MEZCLA	PROMEDIO RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN f'_c - 28 DIAS (Mpa)
M - 0	32,43
M - 1	29,70
M - 2	25,33
M - 3	16,60

Fuente: Autor

6.7.1.3. Falla a los 56 días.

Los especímenes fallados a los 56 días, alcanzaron la resistencia máxima de diseño. Poniendo como referencia el espécimen con 0% de inclusión de Biosólido, el espécimen con 5% logra alcanzar una resistencia de 38,83 Mpa, y los especímenes con 10% y 15% de inclusión de biosólido presentaron una resistencia menor como se muestra en la tabla 22. Se puede observar que a más días de curado, aumentan las resistencias de acuerdo a cada porcentaje.

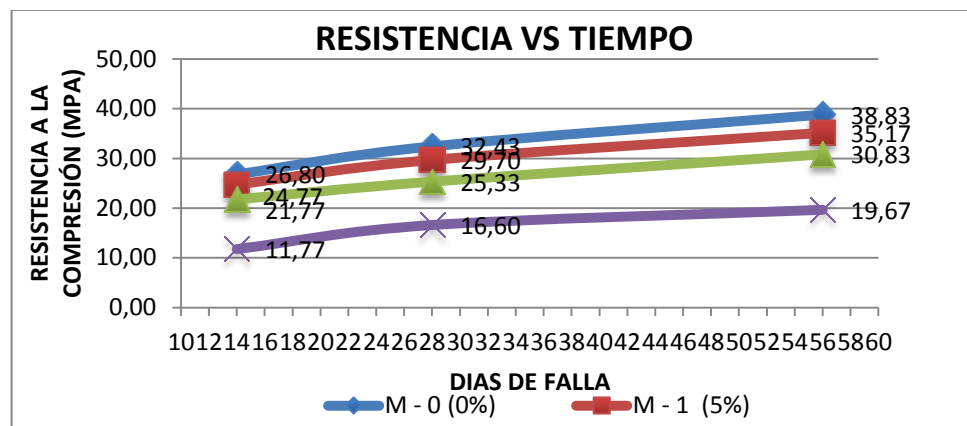
Tabla 22. Promedio resistencia a la compresión en la falla de los 56 días

MEZCLA	PROMEDIO RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN f'_c - 56 DIAS (Mpa)
M - 0	38,83
M - 1	35,17
M - 2	30,83
M - 3	19,67

Fuente: Autor

De acuerdo al proceso de curado, del cual se esperaba que permitiera que la resistencia de los especímenes de concreto aumentara; se obtuvo un resultado positivo debido a que el biosólido tiene materiales cementantes, el cual se puede observar en la Grafica 4 de resistencia a la compresión de acuerdo al paso de los días y al tipo de curado, los especímenes adquirieron más resistencia.

Grafica 4. Comparación promedio de resistencia en los días de falla



Fuente: Autor

DESVIACIÓN ESTÁNDAR⁴¹

Cuando una planta de concreto tiene registros de ensayos de menos de 12 meses de antigüedad, debe establecerse una desviación estándar S_s de la muestra. Los registros de ensayos a partir de los cuales se calcula S_s deben cumplir las siguientes condiciones:

- Representar materiales, procedimientos de control de calidad y condiciones similares a las esperadas, y las variaciones dentro de la muestra no deben haber sido más restrictivas que las de la obra propuesta.
- Representar un concreto producido para que cumpla con una resistencia o resistencias a la compresión especificadas, dentro de 7 Mpa.
- Consistir al menos de 30 ensayos consecutivos, o de dos grupos de ensayos consecutivos totalizando al menos 30 ensayos como se define en C.5.6.2.4, excepto por lo especificado en C.5.3.1.2.

C.5.3.1.2. – Cuando la instalación productora de concreto no tenga registros de ensayos que se ajusten a los requisitos de C.5.3.1.1 (c), pero si tenga un registros de ensayos de menos de 12 meses de antigüedad, basados en 15 a 29 ensayos consecutivos, se debe establecer la desviación estándar de la muestra calculada y el factor de modificación de la tabla C.5.3.1.2. Para que sean aceptables, los registros de ensayos deben ajustarse a los requisitos (a) y (b) de C.5.3.1.1, y deben representar un solo registro de ensayos consecutivos que abarque un periodo no menor de 45 días calendario consecutivo.

Tabla 23. Factor de modificación para la desviación estándar de la muestra cuando se dispone menos de 30 ensayos

Número de ensayos*	Factor de modificación para la desviación estándar de la muestra [†]
Menos de 15	Emplee la tabla C.5.3.2.2
15	1.16
20	1.08
25	1.03
30 o más	1.00

* Interpolarse para un número de ensayos intermedios.

[†] Desviación estándar de la muestra modificada, s_s , para usar en la determinación de la resistencia promedio requerida f'_{cr} de C.5.3.2.1.

Fuente: REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE. Título C, Concreto estructural. Capítulo C5, Calidad del concreto, mezclado y colocación. NSR10. 2010.

⁴¹ REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE. Título C, Concreto estructural. Capítulo C5, Calidad del concreto, mezclado y colocación. NSR10. 2010.

Cumpliendo lo anterior basado en la NSR-10, en la investigación se cuenta con un valor menor a 15 datos; debido a esto y siguiendo lo establecido en el numeral C.5.3.1.2. de la NSR10 y dirigiéndose a la tabla 23. Siguiendo lo que dice en esta tabla dirige a la tabla 24, permite calcular la resistencia promedio requerida a la compresión en (Mpa) utilizando la siguiente formula $f'_{cr} = f'_c + 8,3$.

La desviación estándar no se puede calcular porque se cuenta con muy pocos datos, debido a esto solo se calcula la resistencia promedio a la compresión empleando la siguiente fórmula:

$$f'_{cr} = f'_c + 8,3$$

Esto se realiza para cada una de las mezclas a la edad de 56 días, sabiendo que a esta edad el concreto ya alcanza más del 90% de su resistencia.

Tabla 24. Resistencia promedio a la compresión requerida cuando no hay datos disponibles para establecer una desviación estándar de la muestra.

Resistencia especificada a la compresión, MPa	Resistencia promedio requerida a la compresión, MPa
$f'_c < 21$	$f'_{cr} = f'_c + 7.0$
$21 \leq f'_c \leq 35$	$f'_{cr} = f'_c + 8.3$
$f'_c > 35$	$f'_{cr} = 1.10f'_c + 5.0$

Fuente: REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE. Titulo C, Concreto estructural. Capítulo C5, Calidad del concreto, mezclado y colocación. NSR10. 2010

Se calcula para cada mezcla la resistencia promedio a la compresión requerida:

- Mezcla base sin biosólido:

Resistencia promedio requerida a la compresión, Mpa:

$$f'_{cr} = f'_c + 8,3$$

$$f'_{cr} = 34 + 8,3 = 42,3 \text{ Mpa}$$

- Mezcla 1, con 5% de biosólido:

Resistencia promedio requerida a la compresión, Mpa:

$$f'_{cr} = f'_c + 8,3$$

$$f'_{cr} = 34 + 8,3 = 42,3 \text{ Mpa}$$

- Mezcla 2, con 10% de biosólido:

Resistencia promedio requerida a la compresión, Mpa:

$$f'_{cr} = f'_c + 8,3$$
$$f'_{cr} = 34 + 8,3 = 42,3 \text{ Mpa}$$

- Mezcla 3, con 15% de biosólido:

Resistencia promedio requerida a la compresión, Mpa:

$$f'_{cr} = f'_c + 8,3$$
$$f'_{cr} = 34 + 8,3 = 42,3 \text{ Mpa}$$

Se puede observar que la resistencia requerida para cada mezcla es de 42,3, para una resistencia de diseño de $f'_c = 34$ Mpa.

Para la mezcla M-0 se obtuvo una resistencia promedio de 38,83 Mpa la cual está dentro del rango de 34 Mpa a 42,3 Mpa cumpliendo con las especificaciones de diseño.

Para la mezcla M-1 se obtuvo una resistencia promedio de 35,17 Mpa la cual está dentro del rango de 34 Mpa a 42,3 Mpa cumpliendo con las especificaciones de diseño.

Para la mezcla M-2 se obtuvo una resistencia promedio de 30,83 Mpa la cual no está dentro del rango de 34 Mpa a 42,3 Mpa, no cumple con las especificaciones de diseño.

Para la mezcla M-3 se obtuvo una resistencia promedio de 19,67 Mpa la cual no está dentro del rango de 34 Mpa a 42,3 Mpa, no cumple con las especificaciones de diseño.

6.7.2. Ensayo a la tensión indirecta

Los análisis se llevaron a cabo en los respectivos días de curado 14,28 y 56; en donde 36 especímenes distribuidos en 4 clases de mezcla, así: 9 especímenes con el 0% de inclusión de Biosólido, 9 especímenes con el 5% de inclusión de Biosólido, 9 especímenes con el 10% de inclusión de Biosólido, 9 especímenes con el 15% de inclusión de Biosólido. Las pruebas se realizaron de acuerdo a los parámetros especificados en la norma NTC-722. Ejecutados en el laboratorio de la facultad de ingeniería civil de la Universidad Santo Tomas Tunja.

6.7.2.1. Falla a los 14 días.

Los especímenes fallados a los 14 días, poniendo como referencia el espécimen con 0% de inclusión de Biosólido, presentaron una resistencia baja como se muestra en la tabla 23.

Tabla 25. Promedio resistencia a la tensión indirecta en la falla de los 14 días

MEZCLA	RESISTENCIA A LA TENSIÓN- 14 DIAS (Mpa)
M - 0	1,82
M - 1	1,54
M - 2	1,25
M - 3	0,95

Fuente: Autor

6.7.2.2. Falla a los 28 días.

Los especímenes fallados a los 28 días, poniendo como referencia el espécimen con 0% de inclusión de Biosólido, los especímenes con 5%,10% y 15% de inclusión de biosólido presentaron una resistencia menor como se muestra en la tabla 24, sin embargo presentan mayor resistencia que los especímenes fallados a los 14 días de curado.

Tabla 26. Promedio resistencia a la tensión indirecta en la falla de los 28 días

MEZCLA	RESISTENCIA A LA TENSIÓN - 28 DIAS (Mpa)
M - 0	2,54
M - 1	2,57
M - 2	1,62
M - 3	1,67

Fuente: Autor

6.7.2.3. Falla a los 56 días.

Los especímenes fallados a los 28 días, poniendo como referencia el espécimen con 0% de inclusión de Biosólido, los especímenes con 5%,10% y 15% de inclusión de biosólido presentaron una resistencia menor como se muestra en la tabla 25. Se puede observar que a más días de curado, aumentan las resistencias de acuerdo a cada porcentaje.

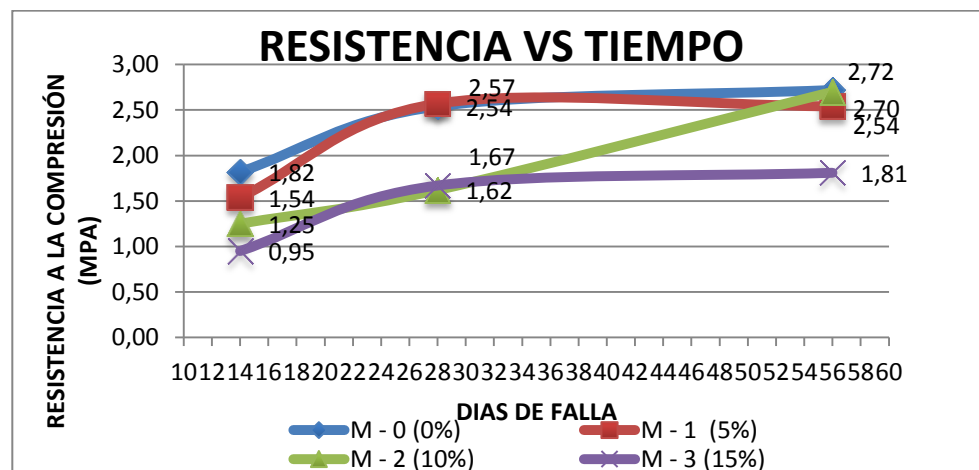
Tabla 27. Promedio resistencia a la tensión indirecta en la falla de los 56 días

MEZCLA	PROMEDIO RESISTENCIA LA TENSIÓN - 56 DIAS (Mpa)
M - 0	2,72
M - 1	2,54
M - 2	2,70
M - 3	1,81

Fuente: Autor

De acuerdo al proceso de curado, del cual se esperaba que permitiera que la resistencia de los especímenes de concreto aumentara; se obtuvo un resultado positivo el cual se puede observar en la Grafica 5 de resistencia a la tensión directa de acuerdo al paso de los días y al tipo de curado, los especímenes adquirieron mayor resistencia.

Grafica 5. Comparación promedio de resistencia en los días de falla



Fuente: Autor

7. CONCLUSIONES

- Con esta investigación, se ha demostrado que se puede Incluir Biosólido en un baja cantidad (5%), como material sustituyente del agregado fino “arena”, para la elaboración de concreto.
- Los especímenes de concreto elaborados con el biosólido se vieron afectados disminuyendo su resistencia a la compresión respecto a la mezcla 0 (mezcla base) en un 9,4% M1, 20,61% M2, 49,34% M3; y a la tensión indirecta en un 6,7% M1, 0,8% M2, 30,6% M3; presentando un comportamiento generalizado de reducción de valores frente a los presentados por la muestra sin sustitución de biosólido.
- Los concretos con mayores pérdidas en la resistencia a la compresión y resistencia a la tracción son los que contienen altos porcentajes de sustitución de biosólido. Sin embargo la resistencia a la compresión con 5% de adición de biosólido presentaron resultados similares a la mezcla base con 0% de inclusión de biosólido.
- Las mezclas con biosólido presentan un aumento en el asentamiento debido al aumento de la cantidad de biosólido que presenta cada mezcla haciendo que estas mezclas sean más fluidas. El peso de los especímenes de las mezclas que contienen biosólido disminuye a medida que el porcentaje de biosólido aumenta.
- A medida que la cantidad de biosólido aumenta, los especímenes presentan un cambio en su apariencia debido a la presencia de materia orgánica, generando un 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 los especímenes son muy sólidos y no presentan ningún tipo de pérdida de material.
- Los especímenes presentan un cambio en su olor a medida que la cantidad de biosólido aumenta con respecto a la mezcla base, a mayor cantidad de biosólido se percibe un cambio en el olor; siendo este un olor debido a la presencia de materia orgánica en el biosólido.

- Las medidas de los especímenes no varían, comparando la mezcla base con las diferentes mezclas con inclusión de biosólido, se mantienen las medidas de diámetro y altura de los cilindros.
- Con esta investigación, se concluye que, para evitar disminuciones grandes en las propiedades mecánicas del concreto, el uso de biosólido debe limitarse a niveles porcentuales menores del 5 %, para minimizar estos impactos negativos.
- El uso de biosólido en el concreto puede satisfacer la demanda para la conservación de un medio ambiente limpio puede ser una opción de reintegrar este material a la vida útil.

RECOMENDACIONES

- Utilizar las herramientas y elementos de protección adecuada; desde el momento en que se manipule el biosólido, hasta el momento de la elaboración de los cilindros, ya que el biosólido contiene gran cantidad de materia orgánica y otros elementos que pueden causar daños en la salud.
- Se recomienda continuar con la investigación, generando un proceso el cual permita eliminar la materia orgánica presente en el biosólido porque el concreto queda con olor a materia orgánica.
- Se recomienda realizar estudios con los mismos porcentajes de sustitución de biosólido pero variando la relación a/c, para lograr concretos con similares características, buscando disminuir el impacto negativo en los resultados de los ensayos.
- Hacer un estudio de costo beneficio, de la implementación de este material como sustituyente de materia prima para la elaboración de concreto.
- Se recomienda realizar el ensayo de difracción de rayos x (DRX) para observar si el concreto queda con hormiguo.
- Se recomienda para realizar el cálculo de la desviación estándar, tener más de 10 datos de resultados por ensayo.

BIBLIOGRAFÍA

Acueducto, agua y alcantarillado de Bogotá. Productos PTAR SALITRE. [En línea]. [17/06/2017]. Disponible de:<<http://www.acueducto.com.co>>

Acueducto, agua, alcantarillado y aseo de Bogotá. « ¿Qué hace la ciudad para descontaminar el río Bogotá?» s.f. [En línea]. [17/06/2017]. Disponible de:<<http://www.acueducto.com.co> >

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA. Manejo de sólidos residuales o biosólidos. [En línea]. [17/06/2017]. Disponible de: <<http://www.oocities.org/edrochac/residuales/biosolidos9.pdf>>

MOZO, GOMEZ, CAMARGO. Efecto de la adición de biosólido (seco) a una pasta cerámica sobre la resistencia mecánica de ladrillos. Universidad de Medellín. Revista ingenierías. Medellín. [En línea]. [16/06/2017]. Disponible en: <<http://www.scielo.org.co/pdf/rium/v14n27/v14n27a05.pdf>>

BERMEO, Andrea; IDROVO, Edgar. Aprovechamiento de lodos deshidratados generados en plantas de tratamiento de agua potable y residual como agregado para materiales de construcción. Universidad de Cuenca. Ecuador. [En línea]. Disponible de: <<http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/20868>>

CARRIÓN, María; BAEZA, Francisco; GÁRCES, Pedro; GALAO, Oscar; PÁYA, Jordi. Uso potencial de ceniza de lodo de depuradora como sustitución de árido fino en bloques de hormigón prefabricados. España. [En línea]. [13/07/2017] Disponible de: <<https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/36270>>

MOZO, William. Elaboración de ladrillos incorporando como materia prima biosólidos de PTAR. Tunja, 2013, 103p. Trabajo de Investigación (Elaboración de ladrillos incorporando como materia prima biosólidos de PTAR). Universidad pedagógica y tecnológica de Colombia, Universidad santo tomas – Tunja, Empresa de acueducto y alcantarillado de Bogotá, Planta de tratamiento de aguas residuales el salitre.

CIARÁN, J. Lynna; RAVINDRA K. Dhirab; GURMEL, S. Ghataoraa; ROGER P. Westb; Sewage sludge ash characteristics and potential for use in concrete.

Construction and Building Materials. Volume 98, 15 November 2015, Pages 767-779. [En línea] [14/07/2017] Disponible de: <<http://www.sciencedirect.com>>

MAHDI, Rafieizonooz; JAHANGIR, Mirza; MOHD, Razman; MOHD, Warid; ELNAZ, Khan. Construction and Building Materials. Volume 116, 30 July 2016, Pages 15-24. [En línea] [14/07/2017] Disponible de: <<http://www.sciencedirect.com>>

SUKHOON, Pyo; HYEONG-Ki, Kim. Construction and Building Materials. Volume 131, 30 January 2017, Pages 459-466 [En línea] [14/07/2017] Disponible de: <<http://www.sciencedirect.com>>

CIFUENTES, Álvaro; Ferrer, Carlos. Análisis del comportamiento mecánico a edades tardías del concreto hidráulico con adición de cenizas volantes de termopaipa. Bucaramanga. 2006. Trabajo de grado (Ingeniería civil). Universidad industrial de Santander. Facultad de ingenierías físico mecánicas. Escuela de ingeniería civil.

TORRES, Patricia; HERNANDEZ, Darwin; PAREDES, Diego. Uso productivo de lodos de plantas de tratamiento de agua potable en la fabricación de ladrillos cerámicos. Chile. Revista Ingeniería de Construcción Vol. 27 No3, Diciembre de 2012, Pág. 145 – 154. [En línea] [18/11/2017] Disponible en: <http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-50732012000300003>

CERÓN, Oswaldo; MILLÁN, Sandra; ESPEJEL, Fabricio; RODRÍGUEZ, Arturo; RAMÍREZ, Rosa María. Aplicación de lodos de plantas potabilizadoras para elaborar morteros y concretos. Instituto de Ingeniería, UNAM. Coordinación de Ingeniería Ambiental. [En línea] [10/11/2017] Disponible de: <https://www.researchgate.net/publication/267369262_APLICACION_DE_LODOS_DE_PLANTAS_POTABILIZADORAS_PARA_ELABORAR_MORTEROS_Y_CONCRETOS>

AVELLA, Marian; incorporación de cenizas de biosólido de PTAR en mezclas de mortero. Tunja, 2014. Trabajo de grado (Especialista en estructuras). Universidad pedagógica y tecnológica de Colombia UPTC. Ingeniería civil.

PEREZ, Cristian. Elaboración de adoquines de concreto, empleando cenizas de biosólido como material sustituyente de materia prima. Tunja. 2016. Trabajo de grado (Ingeniero civil). Universidad Santo Tomas. Facultad de ingeniería civil.

HENRY, J. Glynn y HEINKE, Gary W. ingeniería ambiental. Ed. Pearson education.2ed.

ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principios de diseño. Ed. Escuela colombiana de ingenieros.(2004).

METCALF & EDDY. Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento vertido y reutilización. Ed. Mc Graw Hill.3ed.vol.1.

CRITES, Ron; TCHOBANOGLOUS, George. Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones .Mc Graw Hill.

MAHAMUD LÓPEZ, Manuel; GUTIÉRREZ LAVÍN, Antonio y SASTRE ANDRÉS, Herminio. biosólidos generados en la depuración de aguas (i): planteamiento del problema. Ingeniería del Agua. Vol. 3 Núm. 2 (1996) p.47-62

EPA. (194) A Plain English Guide to the USEPA Part 503 Biosolids Rule.

DÁGUER, Gian Paolo. Gestión de biosólidos en Colombia. En: Revista ACODAI, Noviembre 2003, Vol. 202. [En línea] [02/11/2017] Disponible en :< <http://www.geocities.com/ptarcolombia/gestion.htm> >.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Ingeniería civil y arquitectura. Cemento. Definiciones. NTC 31. Bogotá D.C.: ICONTEC, 1982.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Concretos. Especificaciones de los agregados para concreto. NTC 174. Bogotá D.C.: ICONTEC, 2000.

REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE. Titulo C, Concreto estructural. Capitulo C5, Calidad del concreto, mezclado y colocación. NSR10. 2010

OSORIO, J. D. (2010). Hidratación del concreto: Agua de curado y Agua de mezclado. 360 ° en concreto, 1-3.

RIVERA, Gerardo. Agua de mezcla. Concreto simple. Capítulo 3. [En línea]. [15/11/2017]. Disponible en:
<<ftp://ftp.unicauca.edu.co/cuentas/geanrilo/docs/FIC%20y%20GEOTEC%20SEM%202%20de%202010/Tecnologia%20del%20Concreto%20-%2020PDF%20ver.%20%202009/Cap.%2003%20-%20Agua%20de%20mezcla.pdf>>

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Especificación de desempeño para cemento hidráulico. NTC 121. Bogotá D.C.: ICONTEC, 2014.

FERNÁNDEZ, Rosalba. Materiales estructurales en las construcciones civiles. (1989). CEMENTO PORTLAND.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. Gestión ambiental. Calidad de agua. Parte 13: Guía para el muestreo de lodos de aguas residuales y plantas de tratamiento de aguas. NTC - ISO 5667-13. Bogotá D.C.: El instituto, 1998. 21 p.

ACUEDUCTO. Agua y alcantarillado de Bogotá. Planta de tratamiento de Aguas Residuales EL Salitre Fase 1: Informe Mensual de Actividades Diciembre 2012. Bogotá. [en línea]. [citado 28-08-2013]. Disponible en:
<<http://www.acueducto.com.co/wpsv61/wps/html/resources/PTAR/IA2012/DICIEMBRE.pdf>>

Universidad Católica de Valparaíso. (2008) Escuela de ingeniería en Construcción. CLASIFICACIÓN DE SUELOS. [En línea]. [20/12/2017] Disponible en:
<http://icc.ucv.cl/geotecnia>.