

**CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA DE LODOS PTAP Y CENIZAS DE LODOS  
COMO POSIBLE USO EN LA INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN**



**KARLA ALEJANDRA PORRAS MONTAÑO**

**ARMANDO JOSE VIZCAINO ORTIZ**

**UNIVERSIDAD DE LA COSTA – CUC  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL  
BARRANQUILLA – ATLANTICO  
2020**

**CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA DE LODOS PTAP Y CENIZAS DE LODOS  
COMO POSIBLE USO EN LA INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN**

**KARLA ALEJANDRA PORRAS MONTAÑO**

**ARMANDO JOSE VIZCAINO ORTIZ**

**TRABAJO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO DE GRADO PARA  
OPTAR AL TITULO DE INGENIERO CIVIL**

**Director**

**HEIDIS PATRICIA CANO CUADRO PhD**

**UNIVERSIDAD DE LA COSTA – CUC  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL  
BARRANQUILLA – ATLANTICO**

**2020**

**Nota de aceptación**

---

---

---

---

---

**Presidente de Jurado**

---

**Jurado**

---

**Jurado**

Barranquilla, \_\_\_\_\_ 2020

### **Dedicatoria**

Este trabajo es dedicado en primer lugar a Dios, por habernos brindado la fortaleza necesaria para culminar este proceso; en especial a nuestros padres y familiares que de una u otra manera contribuyeron a que este logro fuera alcanzado con éxito.

A la Dra. Heidis Cano, quien, con su disposición, compromiso, apoyo y entrega, nos guio para poder culminar este proyecto de manera exitosa.

A nuestra compañera de universidad y amiga Marelizza Plaza Vargas, por su apoyo no dejando que olvidáramos el compromiso que debíamos terminar.

A nuestro amigo Cristian Pineda Guevara por su apoyo, ayuda y entrega cuando lo necesitamos.

### **Agradecimientos**

Agradezco a Dios por haber permitido que esta meta fuera posible de culminar, a mi familia, mi mamá Yaneth, mi papá Guillermo y mis hermanos Stephany y Lukas, por su apoyo y confianza durante el recorrido de este largo camino y por ser mi más grande motivación. A mi abuelito Alfredo Porras, quien me demostró lo que es luchar hasta el final.

A mi compañero de aventura y amigo de la vida Armando, por su compañía, paciencia y esmero durante este largo proceso, a mi amiga Marelizza por su apoyo y compañía durante este escalón de nuestras vidas, a Elizabeth por su compañía y motivación en esta nueva etapa de mi vida, a mi amigo Cristian por su valiosa ayuda, a mi tutora de este proceso Dra. Heidis, por su paciencia y disposición durante todo el proceso y a todas aquellas personas que tuvieron una palabra de aliento y ayuda cuando hizo falta. ¡Gracias!

***Karla Alejandra Porras Montaña***

Inicialmente le doy gracias a Dios por permitirme terminar esta etapa tan importante como es la universidad. A mi mamá Judith por tu apoyo y tu constancia sin ti no hubiera podido seguir adelante, a mi papá Armando por tu apoyo incondicional en cada momento y a mis hermanos Andrés y Alice por toda la motivación.

Le agradezco a Karla y Marelizza por su apoyo y amistad incondicional durante todos estos años, por los Excelentes, buenos y los malos momentos, risas no faltaron. Gracias Cristian por tu apoyo incondicional y por tu guía permanente durante todo este tiempo, espero algún día poder retribuirte. A la Dra. Heidis por su guía y constante disposición para hacer posible este trabajo y finalmente a todas las personas que de alguna u otra manera hicieron posible este trabajo.

***Armando José Vizcaíno Ortiz***

### Resumen

En el presente trabajo de investigación, se realizó la caracterización fisicoquímica de lodos provenientes de una planta de tratamiento de agua potable, ubicada en la ciudad de Barranquilla, Colombia; una muestra fue calcinada a 800°C y la otra parte fue expuesta a la intemperie para su secado. Se caracterizaron las muestras de lodo y ceniza de lodo por medio de distintas técnicas tales como; microscopia electrónica de barrido (SEM), densidad, finura, difracción de rayos láser (DRL), difracción de rayos x (DRX); actividad puzolánica y fluorescencia de rayos X (XRF). En dichos resultados se pudo establecer que las muestras de lodo poseen una composición de O: 47,51%, Si :28,79% y Al :11,96% mientras que para la ceniza de lodo se encontraron porcentajes de O: 47,65%, Si: 28,51% y Al: 11,88%. La caracterización física muestra valores de densidad promedio de 2,75 g/cm<sup>3</sup> con una desviación estándar de 0,06; para la muestra de lodo 2,76 g/cm<sup>3</sup> para la muestra de ceniza de lodo con una desviación estándar de 0,04; Porcentajes de finura promedios entre 54,8 a 56,5%. Los resultados de difracción de rayos láser muestran que el 90% en volumen de las partículas analizadas presentan un diámetro inferior de 571 µm. La caracterización química permitió establecer los porcentajes de los componentes presentes en cada una de estas, obteniendo para la muestra de lodo valores de (Cuarzo: 34,3% Ilita: 29,4%, Caolinita 1ª 21,7%) y para la muestra de ceniza de lodo (Cuarzo: 39,1% Ilita 2M1 46,1%). De acuerdo con sus características y mediante el método de Chapelle se clasifica la muestra de ceniza de lodo como puzolana con valores de 1837 mg de CaOH<sub>2</sub>.

**Palabras clave:** Lodo, ceniza, caracterización, SEM, DRX, DRL

### **Abstract**

In the following research work, the physicochemical characterization of sludge from the drinking water treatment plant, located in the city of Barranquilla, Colombia, was carried out; one sample was calcined at 800 ° C and the other part was exposed to the ambient for drying. The calcined and uncalcined muds were characterized by different techniques such as; scanning electronic microscopy (SEM), density, fineness, laser diffraction (DRL), x-ray diffraction (XRD); pozzolanic activity and X-ray fluorescence (XRF). In these results, it could be established that the samples of uncalcined mud could have a composition of O: 47.51%, Si: 28.79% and Al: 11.96%, while for calcined mud, percentages of O were found: 47.65%, Si: 28.51% and Al: 11.88%. The physical characterization shows average density values of 2.75 g / cm<sup>3</sup> with a standard deviation of 0.06; for the uncalcined mud sample 2.76 g / cm<sup>3</sup> for the calcined sample with a standard deviation of 0.04; Average fineness percentages between 54.8 to 56.5%. The results of laser ray diffraction show that 90% by volume of the analyzed particles show a smaller diameter of 571µm. The chemical characterization allowed establishing the percentages of the components present in each of these, obtaining values for the mud sample without calcine values of (Quartz: 34.3% Illite: 29.4%, Kaolinite 1st 21.7%) and for the calcined mud sample (Quartz: 39.1% Illite 2M1 46.1%). According to its characteristics and by the Chappelle method, the calcined sample is classified as pozzolan with values of 1837 mg CaOH<sub>2</sub>.

**Keywords:** Sludge, ash, characterization, SEM, DRX, DRL

**Contenido**

Lista de tablas y figuras .....	10
Introducción .....	13
Planteamiento del problema .....	14
Pregunta problema.....	16
Justificación.....	16
Objetivos.....	16
Objetivo general .....	16
Objetivos específicos.....	16
Marco referencial .....	17
Marco teórico .....	17
Técnicas de caracterización .....	30
Estado del arte .....	42
Metodología .....	47
Caracterización física .....	47
Ensayo de densidad .....	47
Ensayo de finura .....	49
Difracción de rayos laser .....	51
Caracterización química .....	52
Difracción de rayos X (DRX).....	52

Método Chapelle.....	52
Fluorescencia de rayos X.....	54
Caracterización microscópica .....	55
Microscopía electrónica de barrido (SEM) .....	55
Resultados y discusión .....	56
Conclusiones .....	75
Referencias.....	77

**Lista de tablas y figuras****Tablas**

Tabla 1	Principales Compuestos del Cemento Portland.....	25
Tabla 2	Configuración del Equipo PANanalytical.....	52
Tabla 3	Resultados Experimentales Ensayo de Densidad.....	56
Tabla 4	Resultados Obtenido Densidad y Densidad relativa .....	56
Tabla 5	Resultados Experimentales Ensayo de Finura.....	59
Tabla 6	Dispersión de Tamaño de Partícula Ceniza de Lodo a 800 °C (Bohórquez y Pacheco, 2017) Pag. 27.....	60
Tabla 7	Compuestos Presentes en la Muestra de Lodo y Ceniza de Lodo.....	63
Tabla 8	Consumo de Ca(OH) <sub>2</sub> mg/gr de Muestra.....	65
Tabla 9	Compuestos presentes en la muestra de lodo y cenizas de lodo (Bohórquez y Pacheco, 2017) Pág. 24.....	67

**Figuras**

Figura 1	Lugares de Captación TRIPLE A.....	27
Figura 2	Canal Conductor de Agua.....	28
Figura 3	Tanque Sedimentador.....	29
Figura 4	Cárcamo Filtrador.....	29
Figura 5	Microscopio FEI Quanta 200 y su Esquema de Funcionamiento.....	31

Figura 6	Componentes Generales de la Óptica del SEM Convencional.....	32
Figura 7	Esquema del Microscopio Electrónico de Barrido (SEM) Mostrando sus componentes.....	33
Figura 8	Camino Seguido por los Electrones Secundarios a Partir de la Muestra y Formación de la Imagen.....	34
Figura 9	Micrografía Electrónica de una Superficie de Fractura Dúctil de un Acero de Bajo Carbono, donde se Observan las Cavidades Típicas de un Proceso de Rotura Lenta con Alta Deformación Plástica.....	34
Figura 10	Esquema General Difractómetro de Rayos Láser.....	36
Figura 11	Anillos Airy.....	37
Figura 12	Curvas de Distribución de Intensidad Luminosidad Difractada.....	37
Figura 13	Perfiles y Dispersión de Átomos.....	38
Figura 14	Esquema de Excitación y Emisión.....	40
Figura 15	Esquema General de Espectrómetro de Rayos X.....	40
Figura 16	Ubicación Planta de Tratamiento de Agua Potable TRIPLE A.....	47
Figura 17	Frasco de Le Chatelier para Ensayo de Densidad.....	48
Figura 18	Muestra para Ensayo de Densidad.....	48
Figura 19	Queroseno y Muestra.....	49
Figura 20	Tamices para Ensayo de Finura.....	50

Figura 21	Muestras y Tamices para Ensayo de Finura.....	50
Figura 22	Muestras de Ceniza de Lodo.....	53
Figura 23	Muestras para Calcinar.....	53
Figura 24	Envase Erlen Meyer.....	53
Figura 25	Solución Sacarosa.....	54
Figura 26	CaO Reaccionado.....	54
Figura 27	Equipo Empleado para FRX Fulxana Vaneox modelo PR-25m.....	55
Figura 28	Comparativo 1 de densidades .....	58
Figura 29	Comparativo 2 valores de densidad .....	58
Figura 30	Difractograma de Lodo .....	61
Figura 31	Difractograma de Ceniza de Lodo .....	62
Figura 32	Composición y Microestructura de la muestra A; Lodo.....	69
Figura 33	Compuestos Presentes en la Muestra A; .....	70
Figura 34	Composición y Microestructura de la Muestra B; Ceniza de Lodo .....	71
Figura 35	Compuestos Presentes en la Muestra B; Ceniza de Lodo .....	72
Figura 36	A) Microestructura de la muestra de Lodo. B) Microestructura del cemento Portland.....	73

## **Introducción**

En los últimos años la industria de la construcción se ha concentrado en buscar materias primas alternativas, que con su uso no se reduzca la calidad de los elementos que componen cualquier tipo de estructura. Frecuentemente se busca que estas materias primas sean recicladas, obteniendo un beneficio ambiental mayor, sin mencionar el beneficio económico que traería. De esta manera se ha encontrado en los lodos residuales de plantas de tratamiento de agua potable una alternativa como material cementante suplementario.

Los lodos son residuos de plantas de tratamiento de agua potable, los cuales son tratados y vertidos a cuerpos de agua, generando impactos ambientales negativos sobre estos, como lo han demostrado diversos estudios a lo largo de los últimos años. Se ha evidenciado que estos lodos se pueden utilizar en algunos campos de la industria mediante la reutilización de estos y por ende trayendo consigo una disminución del daño ambiental que este ocasiona. Especialmente en el sector de la construcción, autores han desarrollado investigaciones alrededor de lodos provenientes de PTAP y se ha encontrado que estos pueden tener un posible aprovechamiento en la producción de elementos de cerámica de uso externo o en la producción del cemento, donde se reduciría el costo de elaboración sin mencionar los beneficios ambientales con los que se contarían por evitar la explotación de los compuestos del cemento como la caliza, que son sacados de canteras utilizando métodos dañinos al medio ambiente.

Para poder demostrar la viabilidad de la utilización de estos lodos se debe realizar diversos estudios, que soporten su utilización y sus beneficios. Es por eso que el presente proyecto se enfoca en realizar un estudio físico químico a los lodos producto del proceso de potabilización de agua de la planta de tratamiento de la empresa de acueducto de Barranquilla, ubicada en la orilla del río Magdalena en el norte de Colombia.

### **Planteamiento del problema**

El auge de la construcción ha permitido que se dé un incremento de las industrias cementeras, consolidando al cemento como un material indispensable para contribuir al desarrollo de los países en las últimas décadas. La verdadera influencia del sector constructivo en la economía mundial se aprecia en el hecho de que, en 2007, generó 4.7 trillones de dólares (Langdon, 2008), aportando el 10% del PIB global y empleando a más de 111 millones de personas (UNEP, 2009). Por lo general, el sector produce entre el 5 y el 10% de los empleos y aporta del 5% al 15% del PIB de un país (UNEP, 2007), cifra que para Colombia fue del 5,8% en el 2009 (DANE, 2009). (Universidad Nacional de Colombia. et al., 2012). Sin embargo, se observa hoy día que existen algunas problemáticas causadas por el proceso de fabricación de cemento, como lo es la enorme erosión en el área de las canteras por la explotación continua de la piedra caliza y otros recursos naturales, además de la producción del dióxido de carbono.

Por ejemplo, la producción de Clinker de cemento Portland consume cantidades masivas de materias primas (piedra caliza, arcilla), además de las grandes cantidades de energía (850 kcal / kg de Clinker) y el considerable aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero (alrededor de 0,85 kg de CO<sub>2</sub> / kg de Clinker), teniendo en cuenta el impacto negativo de estos efectos, en la actualidad, se buscan alternativas óptimas, con las que se pueda lograr la implementación de nuevas materias primas, lo cual se ha convertido en una preocupación inmediata. (Chen et al., 2010)

Por otra parte, en Colombia se producen desechos originados por los procesos industriales más comunes, entre ellas las plantas de tratamiento de agua potable, en las cuales se produce una cantidad considerable de lodos depurados, “el lodo drenado por las unidades depuradoras corresponden a un valor aproximado entre el 1,5 – 2,0% del volumen de agua que se

genera en la plantas potabilizadoras” (Li et al., 2013). La composición y las propiedades fisicoquímica de los lodos vertidos en cuerpos de agua tienen un impacto negativo sobre la flora y la fauna que rodean estos cuerpos. Los compuestos inorgánicos forman depósitos y bancos de fango en los tramos lentos del cauce, influyendo en la turbiedad y en el color del cuerpo de agua, provocando una disminución en la actividad fotosintética de las plantas de agua, generando problemas medioambientales considerables, por lo tanto, se plantea extraer los residuos sólidos antes del vertimiento en los cauces. (*Francisco Ramírez Quirós*, n.d.) y que, por lo tanto, pueden ser utilizados de diferentes maneras. Se ha demostrado que los lodos pueden tener diferentes usos: La producción de artículos de cerámica, como losas de uso externo. (Alqam et al., 2011); también se ha evidenciado el beneficio en la producción de zeolitas. (Paper & Ram, 2011); y en el sector de la construcción se afirma que los lodos provenientes de plantas de tratamiento de agua no tienen efectos negativos en la formación de minerales para la producción del Clinker, materia prima del cemento. (Chen et al., 2010). El utilizar los lodos residuales podría considerarse como una nueva forma de construcción sostenible, ya que, al convertirse en un innovador mecanismo de gestión, manejo y disposición de residuos, se fortalece el desarrollo sostenible, con un importante aporte en la disminución de explotación y búsqueda de áridos en canteras. Esto permite una mejora en la huella medioambiental, a través del uso de materias primas alternativas que minimizan el impacto y la producción de los principales gases causantes del calentamiento global. De esta manera se establece el problema en una sola dirección: encontrar si, uno de los destinos factibles de los lodos residuales provenientes de una planta de tratamiento de agua potable (PTAP) es la utilización como el reemplazo parcial o total del cemento portland tipo I, en la elaboración de morteros y/o concretos, para ellos en este estudio es indispensable realizar una caracterización fisicoquímica de lodos PTAP y cenizas de lodos con fin de evaluar su posible uso en la industria de la construcción.

**Pregunta problema**

*¿Los lodos provenientes de la Planta de Tratamiento de Agua potable de Triple A en Colombia poseen las características fisicoquímicas para ser usado como posible reemplazo de cemento en la industria de la construcción?*

**Justificación**

El aumento en potencia del sector de la construcción lleva consigo una mayor explotación de materia prima, y afectación al medio ambiente, colocando en riesgo ecosistemas y provocando una pérdida innumerable de flora y fauna. En medio de esta situación, se busca brindar bases en Colombia sobre las características fisicoquímicas de los lodos provenientes de plantas de tratamiento de agua potable, para el aprovechamiento en el sector de la construcción y los diferentes sectores donde sea viable su utilización. La presente investigación se propuso con el fin de analizar de manera detallada las características físicas y químicas que poseen los lodos provenientes de PTAP.

**Objetivos****Objetivo general**

Caracterizar fisicoquímicamente los lodos provenientes de una planta de tratamiento de agua potable calcinados a 800 °C y no calcinados.

**Objetivos específicos**

- Determinar las características físicas de lodos y cenizas de lodo calcinadas a 800 °C, por medio de ensayos de densidad, finura y difracción de rayos láser.
- Evaluar la reactividad de las cenizas de lodo residual como posible material cementante suplementario mediante el método Chapelle.

- Determinar las características químicas de lodos y cenizas de lodo calcinadas a 800 °C, utilizando los ensayos de Fluorescencia de rayos X y difracción de rayos X (DRX).
- Caracterizar microscópicamente los lodos y las cenizas de lodo calcinado a 800 °C, mediante la utilización de la microscopía electrónica de barrido (SEM).

### **Marco referencial**

#### **Marco teórico**

##### **Lodos**

Los lodos pueden definirse básicamente como sólidos con un contenido de humedad variable, una de las fuentes principales de este residuo es la limpieza de los sistemas de alcantarillado urbano o municipal ya sea de las plantas potabilizadoras como de las plantas de tratamiento de agua residual. Las características de los lodos provenientes de las plantas de tratamiento de agua potable dependen principalmente del origen del agua cruda y de los sistemas u operaciones unitarias usados en el tratamiento del agua. Los diferentes procesos de tratamiento generan diferentes tipos y volúmenes de lodo, es normal evidenciar cambios en las características de los lodos eventualmente, y en particular se pueden observar cambios anuales, estacional o diariamente. (Aldana & Pérez, 2017).

##### **Tipos de lodos**

Los tipos de lodos pueden clasificarse según el proceso, tratamiento u operación por la cual el agua es tratada, obteniendo de esa manera la siguiente clasificación (Aldana & Pérez, 2017):

- Lodos aprovechables

Son aquellos lodos provenientes de un proceso de tratamiento que puede ser reutilizado directa o indirectamente en reciclaje, compostaje, generación de energía, entre otros. La mayoría de los lodos provenientes de los procesos de tratamiento aerobios y anaerobios de las plantas de tratamiento de aguas residuales, una vez estabilizados, pueden ser utilizados como abonos, acondicionadores y restauradores de suelos. (Aldana & Pérez, 2017)

- Lodos no aprovechables

Son lodos que no tienen características aceptables para algún aprovechamiento, por ejemplo, tienen muy poca o nula carga orgánica o poder calorífico muy bajo, estos pueden ser desechados junto con los residuos sólidos de origen doméstico en rellenos municipales o mono rellenos. En esta categoría se encuentran los retenidos por rejillas gruesas y finas de las plantas de tratamiento. (Aldana & Pérez, 2017)

- Lodos peligrosos

Son aquellos que contienen sustancias que pueden causar daño a la salud humana o al medio ambiente que deben ser dispuestos en sitios especiales con las medidas adecuadas de seguridad. Comúnmente se suele confundir el término lodo y biosólido. La principal diferencia radica en que el biosólido es un lodo ya estabilizado, es decir, que ha tenido un proceso de tratamiento destinado a reducir la capacidad de fermentación, atracción de vectores y patogenicidad, logrando reducir el nivel de peligrosidad y el grado de restricción para su reutilización (Aldana & Pérez, 2017).

Otra literatura clasifica los lodos de la siguiente manera, teniendo en cuenta el proceso de tratamiento a través de los cuales se obtienen los siguientes subproductos (López, 2009)

- Lodos de decantación primaria

Son generalmente de consistencia limosa y color de marrón a gris, volviéndose sépticos y generando mal olor con gran facilidad. (López, 2009)

- Lodos de precipitación química

Son de color negro y su olor, aunque puede llegar a ser desagradable, lo es menos que los correspondientes a una decantación primaria. (López, 2009)

- Lodos de tratamiento secundario

Son de color marrón, relativamente ligeros, y por estar bien aireados, no suelen producir olor con tanta rapidez como los lodos primarios. Sin embargo, sino se encuentran lo suficientemente aireados, su color se oscurece y producen un olor tan fuerte como el lodo primario. (López, 2009)

- Lodos de lechos bacterianos

Son de color marrón y no producen olores molestos si están frescos. Se degradan a una velocidad menor que los lodos procedentes del sistema secundario, salvo en el caso que contengan organismos superiores (por ejemplo, gusanos), y en cuyo caso si se pueden dar olores rápidamente. (López, 2009)

- Lodos digeridos

Son de color negro y tienen olor a tierra. Este lodo tiene origen en los procesos de digestión aeróbica. Generalmente contienen una proporción de materia orgánica entre el 45 y 60 % (López, 2009)

### **Lodos obtenidos de PTAP**

Por lo general los lodos o fangos procedentes de las estaciones de tratamiento de agua potable se componen básicamente de todas aquellas materias presentes en el agua bruta, los cuales mediante oxidación, coagulación y precipitación son retenidos en decantadores y

filtros; así como por sustancias tales como óxidos e hidróxidos procedentes de coagulantes interventores y otros reactivos como cal, permanganato, utilizados en el tratamiento. (Aldana & Pérez, 2017)

Las sustancias que el agua bruta contiene, por lo general se caracterizan por ser inertes, tales como arcillas, arenas, etc. Y otras que se dependen de la calidad del agua y del tratamiento de potabilización aplicado a esta, tales como sustancias en suspensión como disueltas, inorgánicas y orgánicas como los microorganismos presentes. El análisis de este tipo de lodos pone en manifiesto muchos de los compuestos que recubren la corteza terrestre, variando las proporciones según la naturaleza del terreno atravesado por el agua bruta. (Perilla, 2015)

Si se considera que la mayor parte de las sustancias disueltas en el agua bruta no quedan retenidas en el proceso de tratamiento, a excepción de aquellas que al momento de oxidarse pasan a insolubles como los compuestos de  $Mn^{++}$  y  $Fe^{++}$ , los lodos procedentes del tratamiento de agua están formados, fundamentalmente, por la materia.

### **Utilización de lodos provenientes de planta de tratamiento de agua potable PTAP en la industria de la construcción**

El hombre desde sus inicios ha tenido que adaptarse al entorno en el que se encuentra, de esta manera se ha sometido a aprender a vivir en una constante búsqueda de materiales que le permitan protegerse y lograr suplir algunas de sus necesidades básicas, en la actualidad se logra percibir la industria de la construcción como gran contribuyente al uso desmesurado de los recursos naturales, teniendo en cuenta específicamente, que el constante aumento de las construcciones ha disparado la producción de las industrias cementeras. La forma de producción del cemento causa múltiples daños al medio ambiente, una de ella es la enorme erosión causada

en el área de las canteras por la explotación continua de la piedra caliza y otros recursos naturales. Por otra parte, se generan una gran cantidad de desechos orgánicos generados por los procesos industriales más comunes, como por ejemplo las plantas de tratamiento potable, estas producen una gran cantidad de lodos depurados que son vertidos a cuerpos de agua donde afectan el equilibrio ecológico de este. (Bermeo & Idrovo, 2014). Evaluando estos factores se considera factible implementar el reemplazo de un porcentaje de material cementante en la construcción, con el fin de mitigar el impacto negativo generado por la producción de este, teniendo así una forma de construcción ecológica convirtiéndose en un innovador mecanismo de gestión, manejo y disposición de residuos, se fortalece un desarrollo sostenible, con un imponente aporte a la disminución de la explotación y búsqueda de áridos en canteras. Basado en esto, se ha optado por visionar como contribución a la búsqueda de sostenibilidad, la implementación de recursos reutilizados y tratados, con el fin de obtener un mejor aprovechamiento de estos y lograr disminuir el impacto ambiental. (Bermeo & Idrovo, 2014)

Teniendo en cuenta esto se puede decir que una adecuada gestión de los recursos contribuye a la obtención de un entorno sostenible basado en la reducción de la explotación de canteras y una mejora en la huella medioambiental, esto haciendo uso de materias primas naturales obtenidas del desarrollo de ciertas actividades, siendo el campo de la construcción uno de los más demandantes de recursos naturales, se pretende incrementar el uso de dichas materias primas logrando sustituir en cierto porcentaje algunos de los materiales que en su explotación causan un fuerte daño ambiental. En busca de una alternativa de disposición final de lodos producidos tanto en los tratamientos de Agua Potable y Residual, y basándose en investigaciones previas; este componente se podría incorporar a la industria de la construcción para la elaboración de cementos, ladrillos, hierro y acero, cerámica y materiales refractarios;

constituidos por sales férricas y de aluminio adquiridos en el proceso de coagulación, en PTAP, se plantea la elaboración de morteros mediante el uso de lodos deshidratados provenientes de PTAP que secados térmicamente a no menos de 450 °C los cuales se disponen como la mejor opción para la fabricación de morteros. (Bermeo & Idrovo, 2014)

### **Lodos como materia prima para la elaboración de materiales de construcción**

Se ha planteado emplear los lodos procedentes de las plantas de tratamiento en tres diferentes condiciones, explicados a continuación:

- Lodos deshidratados

En esta fase se toman los lodos deshidratados procedentes de la PTAR, y se los emplea para la elaboración de ladrillos en los porcentajes del 5 y 10% del volumen de un ladrillo tradicional. (Bermeo & Idrovo, 2014)

- Lodos desecados

Los Lodos Deshidratados provenientes de la planta depuradora y potabilizadora son llevados a la estufa y secados a 105°C aproximadamente durante un período de 24h, y posteriormente se realiza su granulometría en donde son empleados como sustituto en porcentajes del 5, 10 y 15% del árido fino (arena) en la elaboración de hormigones. (Bermeo & Idrovo, 2014)

- Cenizas de lodos

En esta ocasión los lodos provenientes de estas plantas de tratamiento son sometidos a un proceso de calcinación (800°C), en donde el producto restante se denomina “cenizas”, las cuales serán aprovechadas como sustituto de la cal (la cual está compuesta básicamente por óxido de calcio) en la fabricación de morteros

cemento- cal-arena comúnmente denominado mortero bastardo. (Bermeo & Idrovo, 2014)

Estudios recientes han trabajado con temperatura superiores a los 800 °C como (Cong et al., 2020) que utilizo en su estudio temperaturas máxima 900 °C, para la calcinación de lodos.

### **3Cemento**

El cemento es una de las materias primas más populares en el ámbito de la construcción, y actualmente su uso es indispensable, debido a su versatilidad y economía. Además de esto sus propiedades permiten un aprovechamiento extremo en una multitud de usos, es un elemento activo en la mezcla de mortero y concreto. Para dar una definición más general, el cemento es un conglomerante hidráulico que al mezclarse con agua forma una pasta que fragua y endurece debido a los procesos de hidratación, este una vez endurecido, forma un material compacto con resistencia y durabilidad adecuada para el uso constructivo. Para la fabricación del cemento se pueden utilizar tanto minerales de origen natural como productos industriales, como materiales de partida sirven sustancias minerales que contienen los componentes principales del cemento: cal, sílice, alúmina y óxidos de hierro. Como es difícil encontrar las proporciones deseadas en una sola sustancia, por lo general se elige una mezcla rica en cal (componente calcáreo) con otro pobre en cal pero que contiene más alúmina y óxidos de hierro (componente arcilloso). Entre los dos componentes base generalmente se tiene, la caliza y arcilla o la caliza y la marga (Duda, 1997)

### **Componentes calcáreos:**

- **Caliza**

El carbonato cálcico ( $\text{CaCO}_3$ ) es abundante en la naturaleza, para fabricar el cemento portland es adecuado el procedente de todas las formaciones geológicas. Las formas más populares de la caliza son el espato calizo (Calcita) y el aragonito. La caliza posee, por lo general, estructura cristalina de grano fino. La dureza de esta por lo general se determina de acuerdo con su edad geológica, entre más antigua sea la formación más dura suele ser la caliza (Duda, 1997)

- **Creta**

La creta es una roca sedimentaria, que en oposición a la caliza, la creta posee una estructura suelta, terrea, esta propiedad califica a este tipo de roca de modo especial para su uso en la fabricación de cemento, debido a que su extracción no exige explosivos ni tampoco debe ser triturada, el costo de este componente disminuye de manera considerable el de la fabricación del cemento. (Duda, 1997)

- **Marga**

A las calizas que van acompañadas de sílice y de productos arcillosos, así como de óxido de hierro, se les llama margas. Las margas forman el paso de transición a las arcillas. Debido a su abundancia suelen ser usadas con frecuencia en la fabricación de cemento, la dureza de este tipo de roca suele ser menor que el de la caliza, debido a su elevada concentración de material arcilloso. (Duda, 1997)

### **Composición química del cemento**

Durante la operación de combustión en la fabricación de Clinker de cemento portland, el calcio se combina con los otros componentes de la mezcla cruda para formar cuatro componentes

principales que constituyen el 90% de cemento por masa. (Duda, 1997). En la tabla 1 se encuentran expresados en porcentajes los principales compuestos del cemento Portland, en la cual se observa el compuesto con mayor porcentaje es CaO, representando más del 50% de la composición de este.

### Óxidos de la producción del cemento

Tabla 1

*Principales Compuestos del Cemento Portland.*

Cal	CaO	————→	60-67%
Sílice	SiO <sub>2</sub>	————→	17-25%
Alúmina	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	————→	3-8%
Óxido de hierro	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	————→	0,-6%
Periclasa	MgO	————→	0,1-4%
Álcalis	Na <sub>2</sub> O, K <sub>2</sub> O	————→	0,2-1,3%
Sulfato	SO <sub>3</sub>	————→	1-3%

Nota: Fuente: (Duda, 1977)

La cantidad de calcio, sílice y alúmina dan el parámetro inicial acerca de la cantidad de los compuestos primarios en el cemento y la efectividad de este luego de su proceso de hidratación.

- **Alita- silicato tricálcico (c3s)**

Es el principal y decisivo mineral del Clinker para sus cualidades resistentes, este compuesto genera un endurecimiento más rápido y un buen desarrollo de resistencia mecánica. (Duda, 1997)

- **Belita- silicato dicálcico (c2s)**

La Belita se endurece mucho más lento que la alita, sin embargo, después de largos plazos, alcanza la misma resistencia que aquella. Es conocida como la segunda fase en

importancia, teniendo en cuenta esto se puede decir que las fases Alita y Belita suman aproximadamente el 75% del cemento y determinan el desarrollo de su resistencia.

(Duda,1997)

- **Aluminato- aluminato tricálcico (c3a)**

Este componente libera gran cantidad de calor durante los primeros días de hidratación y endurecimiento, contribuye ligeramente al desarrollo temprano de la fuerza, pero contribuye muy poco a la resistencia del cemento, los cementos con bajos porcentajes de Aluminato tienen la característica de ser más resistentes a los suelos y aguas que contienen sulfatos. (Duda, 1997)

- **Ferrita o Celita**

Es el producto resultante del uso de materias primas de hierro y aluminio para reducir la temperatura durante la fabricación del cemento, este componente contribuye en bajos porcentajes a la fuerza. (Duda, 1997)

### **Área de obtención de lodos**

#### **Planta de tratamiento de agua potable**

Teniendo en cuenta que las muestras de lodos fueron obtenidas de la planta de tratamiento de Agua Potable, ubicada en la ciudad de Barranquilla-Colombia, a continuación, se explicara el proceso al cual se somete el agua bruta, para ser potabilizada en esta PTAP.

Triple A es conocida por su modelo de gestión en el sector de agua potable y saneamiento básico, contribuyendo al progreso, crecimiento y sostenibilidad. Por esto hace énfasis en la

importancia de la potabilización del agua, considerando que los factores externos a los que esta se enfrenta pueden hacerla un riesgo para la salud si es consumida (TRIPLE A S.A. E.S.P.)

### Descripción de procesos de potabilización

El tratamiento de aguas en dicha empresa se da en las siguientes etapas:

- **Captación**

Para esta etapa el acueducto de Barranquilla toma el agua cruda del Río Magdalena a través de una bocatoma que la lleva a una laguna o dársena. Una vez allí, el líquido pasa a dos estaciones de bombeo, una ubicada en la dársena y la otra al final de un conducto de agua, conocido como Canal de Aducción. Desde el inicio de este proceso el agua se ve sometida al proceso de clarificación. Luego de estas dos estaciones, mediante bombeo el agua es transportada a las plantas de tratamiento mediante tuberías de gran diámetro. (Potabilización - Triple A S.A. E.S.P. / Empresa de Servicios Públicos, n.d.) La figura 1 muestra las estaciones de captación de la empresa Triple A ubicadas en la zona, donde se realiza la captación de agua directamente desde el río Magdalena.



Figura 1. Lugares de captación TRIPLE A Fuente: (Potabilización - Triple A S.A. E.S.P. / Empresa de Servicios Públicos, n.d.)

- **Coagulación- floculación**

Teniendo en cuenta que el agua contiene en ella sólidos suspendidos, la remoción de estos implica varios procesos continuos que involucran mecanismos químicos y

físicos. El proceso conocido como coagulación, consiste básicamente en la adición de productos químicos coagulantes, que causan desestabilización de las partículas coloidales, lo que produce a su vez partículas llamadas flóculos, esta reacción se produce en fracciones de segundo con una fuerte agitación. Luego de realizar este proceso y mediante una lenta agitación, se adiciona otro producto químico, un polímero el cual actúa como floculante, el cual produce la agregación de los flóculos formando partículas de mayor peso y tamaño. (*Potabilización - Triple A S.A. E.S.P. / Empresa de Servicios Públicos, n.d.*). En la figura 2 se observa los canales de conducción de agua, que dirigen el líquido sin tratar para los procesos de coagulación.



Figura 2. Canal conductor de agua, Fuente: (*Potabilización - Triple A S.A. E.S.P. / Empresa de Servicios Públicos, n.d.*)

- **Sedimentación**

Luego de esto el agua floculada pasa a las unidades de decantación o clarificación en donde se realiza la separación de los sólidos más densos. Para esto se hace uso de estructuras que se conocen como decantadores, los cuales a su vez se clasifican en decantadores de flujo horizontal, de flujo ascendente, de manto de lodos y de recirculación de lodos. En esta etapa se ha logrado eliminar cerca del 75% de las impurezas biológicas e inorgánicas del agua. (*Potabilización - Triple A S.A. E.S.P. / Empresa de Servicios Públicos, n.d.*). En la figura 3 se observan los tanques sedimentadores de la planta de tratamiento de Triple A.



Figura 3. Tanque sedimentador, Fuente: (*Potabilización - Triple A S.A. E.S.P. / Empresa de Servicios Públicos, n.d.*)

- **Filtración**

En la figura 4 se observa un cárcamo filtrador en este proceso se emplean filtros de arena con lechos de grava y se da luego del proceso de clarificación, se realiza la filtración del agua con el fin de eliminar aquellas partículas que no fueron removidas en la decantación (*Potabilización - Triple A S.A. E.S.P. / Empresa de Servicios Públicos, n.d.*)



Figura 4. Cárcamo filtrador, Fuente: (*Potabilización - Triple A S.A. E.S.P. / Empresa de Servicios Públicos, n.d.*)

- **Desinfección**

Para obtener el agua completamente transparente como es habitual, esta debe ser sometida a un proceso de desinfección a fin de eliminar todos aquellos microorganismos patógenos, causantes de enfermedades. Este proceso se da mediante el adiconamiento de cloro gas al agua en la salida de las plantas, antes de que esta llegue a los tanques de almacenamiento (*Potabilización - Triple A S.A. E.S.P. / Empresa de Servicios Públicos, n.d.*)

- **Alineamiento, bombeo y distribución**

Culminadas estas etapas el agua potable es almacenada en depósitos o tanques de almacenamiento desde donde es bombeada a la red de distribución y a otras estaciones de rebombeo. Este proceso se da mediante sistemas de distribución, los cuales están conformados por grandes tuberías de conducción y redes domiciliarias, las cuales finalmente se encargan de llevar el agua potable a los usuarios. (*Potabilización - Triple A S.A. E.S.P. / Empresa de Servicios Públicos, n.d.*)

## **Técnicas de caracterización**

### **Caracterización microscópica**

- **Microscopia electrónica de barrido (SEM)**

Las imágenes que son producidas por un microscopio electrónico son obtenidas por medio de la detección, procesamiento y visualización de señales resultantes de las interacciones de un haz de luz de electrones, con las muestras. Estas interacciones proporcionan generalmente información sobre la composición, la estructura y la topografía en los ejes (x, y, z). En la figura 5 se observa el microscopio electrónico de barrido Quanta 200 y en la parte inferior derecha se

muestra el esquema principal de funcionamiento que sigue el microscopio, además de los elementos que lo componen.

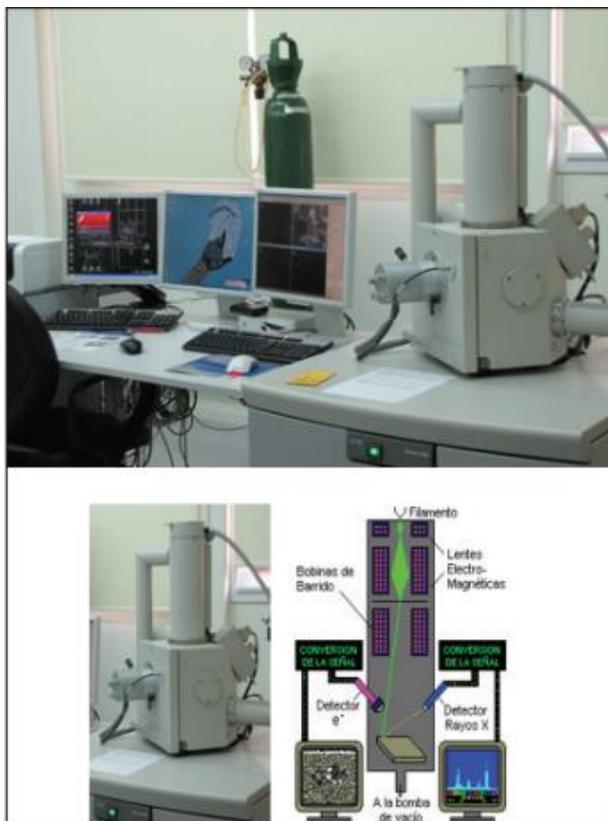


Figura 5. Microscopio FEI Quanta 200 y su Esquema de Funcionamiento. Fuente: (La et al., n.d.)

La microscopía electrónica de barrido se basa en electrones emitidos por un cátodo de tungsteno, este pasa a través de una columna que cuenta con un vacío alrededor de  $10^{-7}$  Torr. En ella el haz de luz inicialmente se concentra en una serie de lentes electromagnéticas como se muestra en la Figura 5, desde unos 25.000 – 50.000 nm hasta unos 10 nm; con el cual el diámetro va disminuyendo al pasar los lentes hasta hacerse casi puntual. Al mismo tiempo, la intensidad de la corriente se encuentra disminuyendo de unos  $10^{-4}$  A hasta unos  $10^{-10}$  -  $10^{-12}$  A. Con esta disminución de la intensidad se indica que la cantidad de electrones primarios va decreciendo, partiendo de una intensidad inicial de  $10^{-4}$  A con una emisión de  $10^{14}$  e-/seg, mientras que la definitiva de  $10^{-12}$  A, es de  $6.106$  e-/seg.

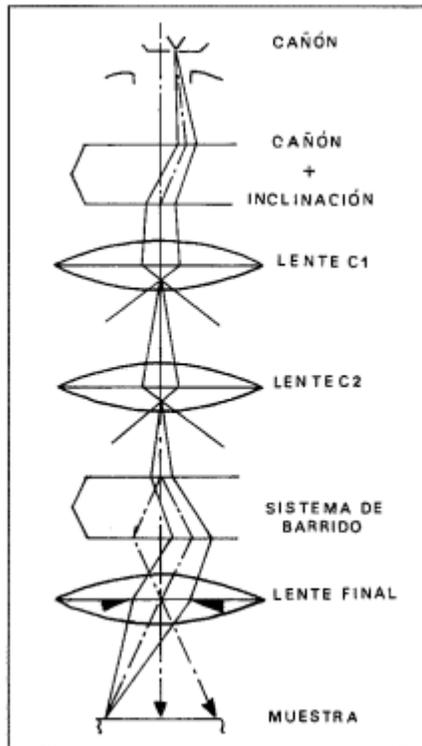


Figura 6. Componentes Generales de la "Óptica" del SEM Convencional, Nota: Fuente: (Renau-Piqueras & Faura, 1994).

El haz definitivo que se produce (puntual) es desplazado sobre la superficie de la muestra como si funcionara como un pincel, con idas y venidas barriendo la muestra. Esto se consigue gracias a las bobinas de barrido con la que cuentan los instrumentos (como se observa en la Figura 6 y 7).

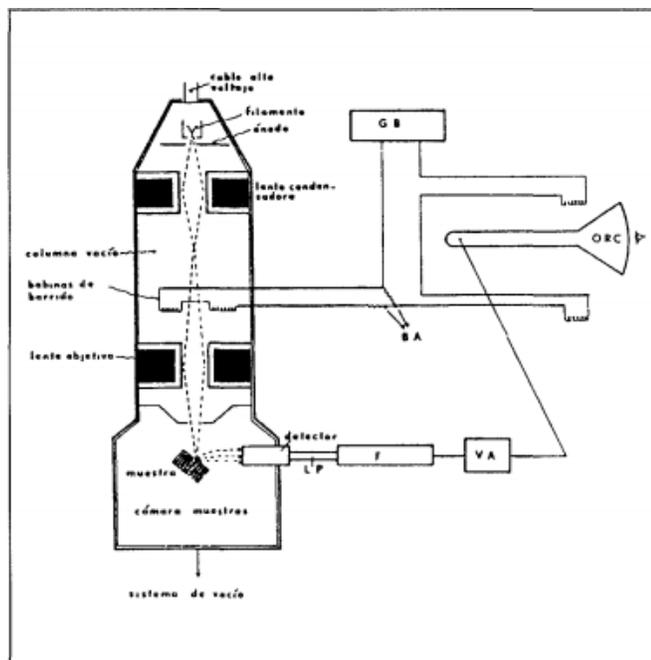


Figura 7. Esquema del Microscopio Electrónico de Barrido (SEM) Mostrando sus Componentes, Nota: Fuente: Elaboración de (Renau-Piqueras & Faura, 1994)

Esta interacción de la muestra con el haz electrónico produce electrones (e-) secundarios que son captados por un detector llevándolos a incidir sobre un “scintillator”, donde cada e- originará varios fotones. Estos fotones son dirigidos a un fotomultiplicador, a través de un cañón de luz, donde cada fotón dará origen a un fotoelectrón, estos fotoelectrones utilizando una serie de dinodos con diferencias de potencias crecientes produce con un efecto de cascada una gran cantidad de e- secundarios. Con esto se busca una amplificación de la corriente debido a los e- originales, otra manera de verlo sería la amplificación de información sobre la muestra que se suministra con una cantidad de e- especificados.

Finalmente, los e- secundarios o definitivos atraviesan un video amplificador para luego ser dirigidos hacia un tubo semejante a un osciloscopio de rayos catódicos, dando origen a una imagen sobre una pantalla como se puede observar en la Figura 8.

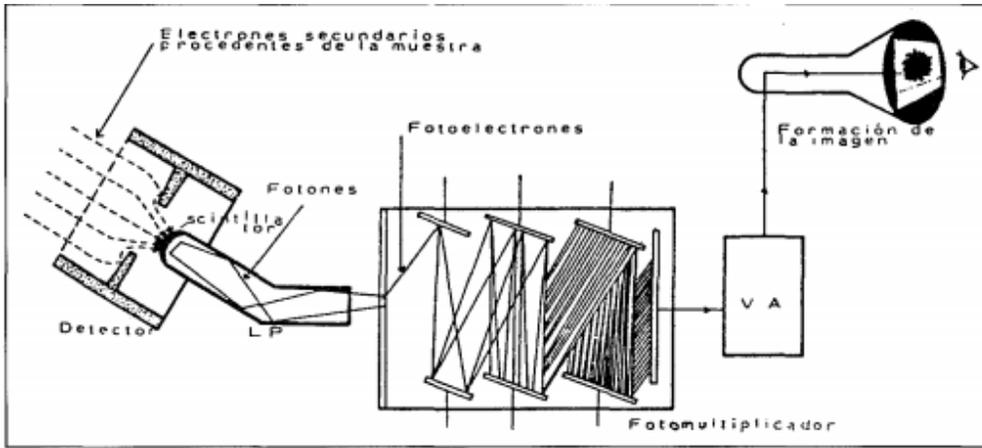


Figura 8. Camino Seguido por los Electrones Secundarios a Partir de la Muestra y Formación de la Imagen, Nota: Elaboración de (Renau-Piqueras & Faura, 1994)

La figura 9 muestra la micrografía electrónica de una superficie de acero dúctil, esta imagen es producto del análisis de microscopía electrónica de barrido. En la figura se observan las cavidades típicas del proceso de rotura lenta con alta deformación plástica del acero (La et al., n.d.).

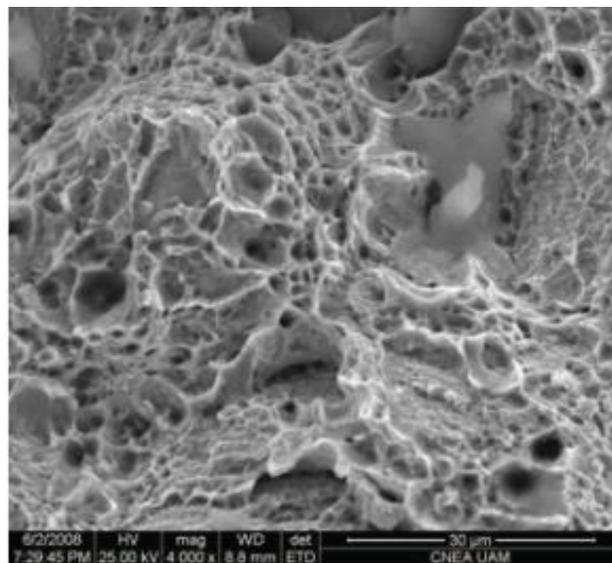


Figura 9. Micrografía Electrónica de una Superficie de Fractura Dúctil de un Acero de Bajo Carbono donde se Observan las Cavidades Típicas de un Proceso de Rotura Lenta con Alta Deformación Plástica, Nota: Elaboración de (La et al., 2013)

Los tipos de señales que generalmente son emitidas por las muestras con la interacción del haz electrónico son los que dan lugar a la generación de información a través de imágenes.

Las señales son clasificadas en tres tipos:

- a. Señales con carácter de ondas electromagnéticas, como son los rayos X y catodoluminiscencia.
- b. Señales compuestas por e-, que incluyen además e- reflejados, e- secundarios, transmitidos y absorbidos.

La microscopía electrónica de barrido tiene la posibilidad de elaborar análisis cuantitativos de los componentes de la muestra tras la irradiación del haz electrónico, así como en el campo biológico con el análisis de inmunocito químico de los componentes de la superficie de una muestra, que es la técnica generalmente utilizada con bastante éxito a los antígenos de la superficie linfocitarios, así como para los lugares de unión de virus del SIDA.

### **Caracterización física**

- **Ensayo de Densidad**

La densidad es la masa por unidad de volumen de un cuerpo. En el caso de la densidad aparente es una característica que se utiliza generalmente para calcular el volumen que ocupa el agregado en las mezclas que contienen dichos agregados, como por ejemplo el caso de la arena en las mezclas de mortero o concreto.

- **Difracción de rayos láser**

La utilización del método de difracción de rayos láser consiste en hacer pasar un láser monocromático por una muestra, que se encuentre seca, pulverizada o en suspensión contenida en un líquido no reactivo. En caso de que las partículas que son iluminadas por el láser sean de

un tamaño único, el láser formara una figura de difracción, la cual contara con una energía de distribución que sigue la Ley de AIRY. La figura 10 muestra el esquema general de un difractor de rayos láser, en él se observa los principales elementos que componen el difractor.

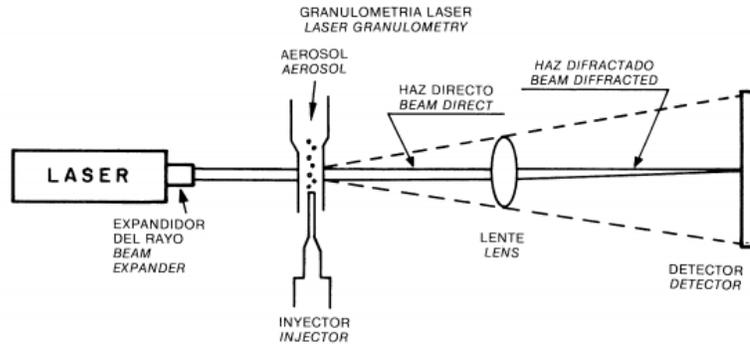


Figura 10. Esquema General Difractor de Rayos Láser. Nota: Fuente: (FRÍAS et al., 1988)

El método especifica que los radios de los anillos son inversamente proporcionales al diámetro de los anillos y por el contrario la intensidad de la luminosidad de los anillos es directamente proporcional al número de vistas que produce el haz luminoso. Cuando las partículas cuentan con tamaños diferentes, la figura de difracción que se obtiene se basa en la superposición de AIRY, como se muestra en las Figuras 11 y 12, en las cuales se pueden observar diferentes diámetros de partículas.

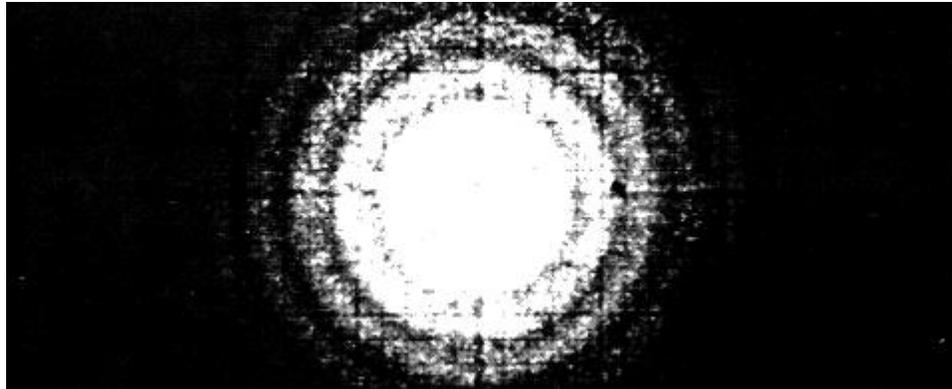


Figura 11. Anillos Airy. Nota: Fuente: Elaboración de (FRÍAS et al., 1988)

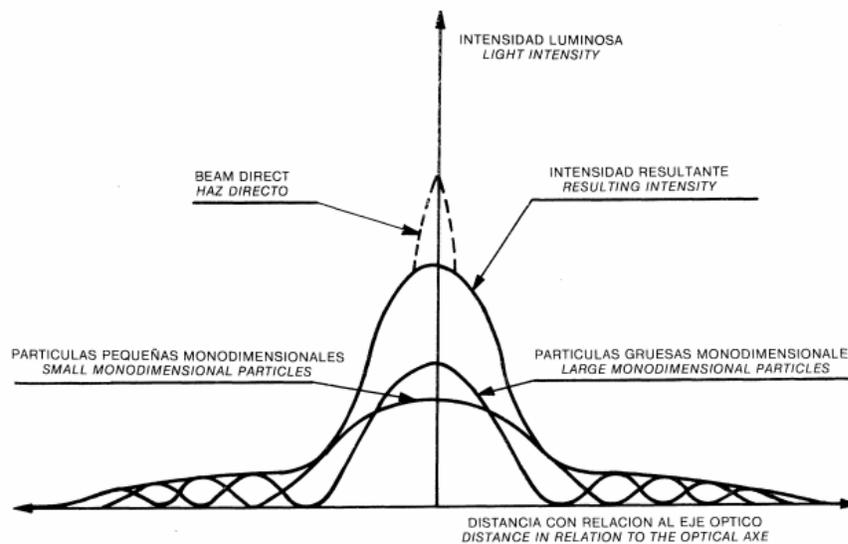


Figura 12. Curvas de distribución de intensidad luminosidad difractada. Fuente: (FRÍAS et al., 1988)

### Caracterización química

- **Difracción de Rayos X**

El método de difracción de Rayos X es utilizado generalmente para la caracterización de los materiales, los cuales deben cumplir con la condición de tener una estructura cristalográfica definida, este se debe a que la información que se obtiene por la interacción de los Rayos X y los cristales presentes en la muestra, se basan en la difracción que puede producir los átomos en un

arreglo ordenado. En general el ensayo se enfoca en determinar si el material es cristalino o amorfo o en algunos casos, ambos. El ensayo de DRX permite determinar si un material es amorfo por el tipo de perfil de difracción que genera, cuando el perfil sea en forma de picos nos indica que el material cuenta con una estructura definida lo que no lo cataloga como un material amorfo. Los planos que se obtienen del ensayo son característicos en ancho y altura de los picos, lo cual está directamente relacionado con el tamaño de los cristales de la muestra.

Otras de las aplicaciones del ensayo Difracción de Rayos X es definir parámetros de materiales como; la pureza de las muestras, identificación de las fases, medida de tensiones, análisis cuantitativo, determinación de los diagramas de fase, determinación de las estructuras cristalinas, estudio de texturas, etc.

El ensayo de difracción de rayos X ayuda en gran medida a determinar también la homogeneidad de la fase cristalina de los materiales así, como el diámetro de los cristales situados en una misma dirección.

La interferencia de los rayos con la muestra se puede representar en planos que se conocen como perfiles de difracción, cada material cuenta con el perfil de difracción característico como se muestra en la Figura 13.

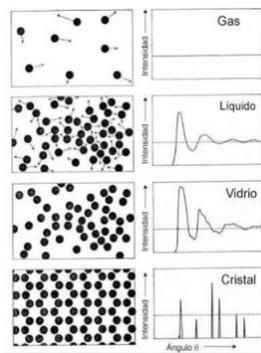


Figura 13. Perfiles y Dispersión de Átomos, Fuente: (Cristalografía. Dispersión y Difracción, n.d.)

- **Fluorescencia de rayos X**

Cuando un átomo se encuentra en estado fundamental, su estructura cuenta con niveles y subniveles de energía que son ocupados por los electrones, situándose inicialmente en los niveles que cuentan con un grado mínimo de energía, hasta llegar a ser ocupados en su totalidad.

El ensayo de fluorescencia de rayos X consiste en emitir un haz de electrones o fotones de rayos X sobre los átomos. Estos átomos pueden responder con la reflexión y creación de un espectro característico de rayos X, partiendo de los elementos que componen la muestra, que se sometió al haz de electrones o fotones. Si se logra identificar la longitud de onda o energía emitida por las muestras se podrá conocer los elementos que ella se compone y si se logra medir la intensidad de estas ondas, se puede reconocer su concentración.

En el proceso de producción del espectro característico pueden ocurrir dos procesos fundamentales:

- **Excitación**

Este ocurre cuando un electrón o fotón X choca incidentemente sobre un electrón de las capas internas del átomo, produciendo la expulsión de dicho electrón o fotón X dejando el átomo en un estado excitado.

- **Emisión**

La emisión ocurre cuando el átomo, en estado excitado tiende a volver casi que inmediatamente a su estado fundamental, produciendo saltos de electrones que se encuentran en los niveles externos para cubrir los huecos que se produjeron por el choque. Es característico que en el proceso se desprenda energía, con una cantidad de

energía igual de los niveles entre los que se produce el salto electrónico, en forma de radiación electromagnética correspondiente a la región de rayos X.

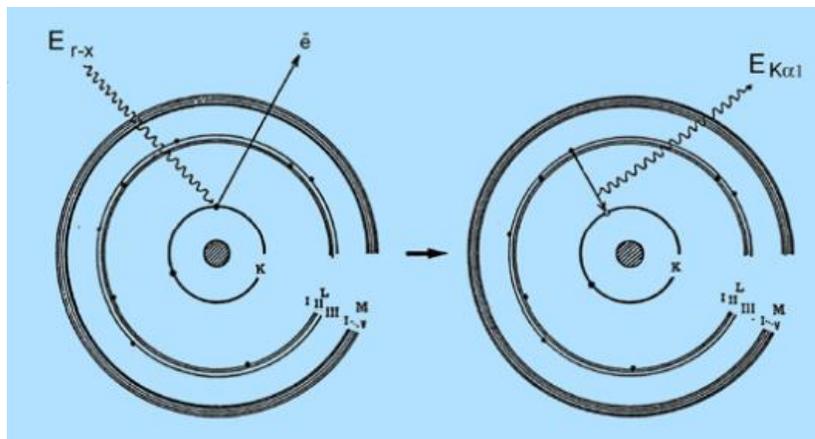


Figura 14. Esquema de Excitación y Emisión. Nota: Fuente: ([http://www.uned.es/cristamine/mineral/minbas\\_mrc.htm](http://www.uned.es/cristamine/mineral/minbas_mrc.htm))

En la figura 15 se muestra el esquema del espectrómetro de rayos X, que recibe su nombre porque el espectro de fluorescencia que se genera por la muestra al ser sometida a la excitación debido al haz de radiación producido por el tubo de rayos X, es descompuesto por los componentes monocromáticos en función de las longitudes de onda, por la difracción sobre el monocristal de espaciado conocido.

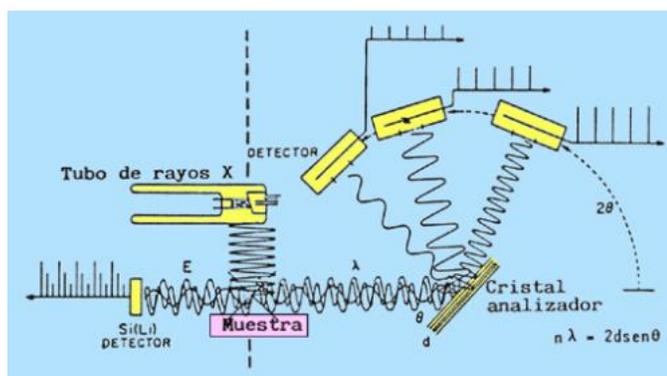


Figura 15. Esquema General de Espectrómetro de Rayos X. Nota: Fuente: ([http://www.uned.es/cristamine/mineral/minbas\\_mrc.htm](http://www.uned.es/cristamine/mineral/minbas_mrc.htm))

El método utiliza la ley de Bragg conocida por la fórmula:  $n\lambda = 2d\sin\theta$ , el cual mide y utiliza el ángulo  $\theta$  con el que se difracta cada una de las radiaciones que forman el espectro que emite la muestra, así como el espaciado  $d$  que se conoce del cristal analizador, determinando el lado de cada una de las ondas  $\lambda$ . Permitiendo que la intensidad de la onda nos permita conocer la composición cuantitativa, mientras que la longitud de la onda nos da a conocer la composición cualitativa.

- **Método Chapelle**

Según la literatura previamente estudiada se conocen varios métodos para la determinación de la actividad puzolánica, los criterios más comunes para determinar la actividad puzolánica es su índice de actividad de la fuerza de acuerdo con la C311 Standard ASTM [12] mediante la aplicación de la prueba de resistencia a la compresión de una mezcla de material de cemento-puzolánico. Esta prueba es indirecta y no da ninguna información sobre el material puzolánico en sí, ya que el resultado depende de las características químicas y físicas del material (Quarcioni, Chotoli, 2015).

La determinación directa del consumo de calcio por el método prueba de Chapelle modificado es un método para la determinación directa del consumo puzolana cal. Una suspensión de puzolana / cal (1 g / 1 g) y un espacio en blanco de cal se mantienen reaccionando a 90 ° C durante 16 horas; la cal consumida se calcula por la diferencia entre el agregado y la cal restante. Este método se aplicó en cementos puzolánicos industriales Portland y también preparados en el laboratorio con tres cementos Portland de diferentes contenidos de C 3 puzolanas A y siete, laboratorio con tres cementos Portland de diferentes contenidos de C 3 puzolanas A y siete, cuyos niveles de sustitución fueron 10%, 20% y 35% en la misma finura Blaine, totalizando 63 muestras. (Quarcioni, Chotoli, 2015).

### Estado del arte

La potabilización de agua genera lodos residuales que generalmente son tratados y vaciados a cuerpos de agua como destino final, sin embargo, en las últimas décadas se ha evidenciado un daño ambiental en los cuerpos de agua donde son vertidos. Actualmente hay estudios que comprueban la situación, es por eso que a través de los años se han realizado diversas investigaciones que evidencien la viabilidad de la utilización de estos lodos en diferentes sectores de las industrias, buscando así la reducción del impacto ambiental que produce el tratamiento de agua para el consumo diario de la civilización. A continuación, se presentan algunos estudios de la última década que promueven la utilización de estos lodos;

Tantawy M. (2015) caracterizó las propiedades puzolánicas de los lodos provenientes de la planta de tratamiento de agua. Estos secaron el lodo y luego lo molieron hasta llevarlo a ser polvo fino. Para finalmente ser calcinado en un horno eléctrico. A este lodo calcinado se le hicieron estudios como Chapelle. Se realizaron análisis de fluorescencia de rayos X, difracción de rayos X, microscopia de barrido, análisis termo gravimétrico. Los resultados del estudio muestran que las cenizas de lodo se componen de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  y cumplen los requisitos para puzolana. El ensayo de difracción de rayos X mostró que la principal materia orgánica cristalina presente en los lodos calcinados son el cuarzo, albita y la calcita. El ensayo de FTIR mostro que el aumento de la temperatura de la calcinación de los lodos produce cambio en la estructura de enlace de la red de silicato que acompaña a la cristalización de la sílice. Los resultados del TGA de los lodos mostro que la calcinación de lodos estuvo acompañada de reacciones químicas, eliminación de humedad, descomposición de la materia orgánica, deshidratación del  $\text{Al}(\text{OH})_3$  coloidal y la cristalización de la sílice amorfa. El ensayo SEM indica que las condiciones de calcinación de lodos afectan enormemente la microestructura. El

XDR mostro que la sílice amorfa y alúmina reaccionan bajo la hidratación a alta temperatura con hidratos de aluminato de calcio formadores de cal e hidratos de silicato de calcio. Los resultados de FTIR mostraron que la calcinación de los lodos a 800 °C es suficiente para mejorar su actividad puzolánica. Por último, el SEM mostro que la cantidad y la densidad de los hidratos de aluminato de calcio formados por la reacción de puzolánica disminuye con la temperatura de calcinación de los lodos de alumbre. (Tantawy, 2015)

Benlalla. A (2015) evaluó los efectos de la incorporación de lodos de tratamiento de agua (WTS) de la planta de Boutegreg. Estos proponen probar las arcillas en la utilización para la fabricación de cerámica que incorpora lodos de alúmina. Estos Calcinaron las muestras a 800, 900 y 1000 °C, para así determinar propiedades como: densidad aparente, contracción lineal, absorción de agua, resistencia a la compresión, microestructura y cristalinidad además del estudio de difracción de rayos X y microscopia electrónica de barrido. El estudio demuestra viabilidad en el uso de este material. La combinación de técnicas XRD, SEM y la caracterización física permitieron un mejor análisis de la evolución estructural y mineralógica después de la calcinación a 1000 °C. Las propiedades analizadas son compatibles con las especificadas para ladrillos cerámicos. La proporción de lodos en la mezcla y la temperatura de cocción son los dos factores clave que afectan la calidad del ladrillo. En total, la proporción recomendada de lodo en ladrillos es del 20%, con un contenido de humedad óptimo del 30%, preparada en mezclas de metales y cocida entre 900 ° C y 930 ° C para producir un ladrillo de buena calidad. (Benlalla et al., 2015)

Ávila Y. (2016) realizo un análisis comparativo entre la concentración de óxidos presentes del cemento portland y lodos de plantas de tratamiento de agua potable para determinar si era viable su uso en el área la construcción civil. Tomaron muestras de dos plantas de

tratamiento de agua potable (PTAP) en la región caribe colombiana. Clasificándolos como lodo A y lodo B, el lodo A proviene de una planta que capta agua superficial, en cambio el lodo B capta agua subterránea. Para ser comparadas las concentraciones de óxidos de estos con el cemento portland tipo II. Para determinar los óxidos presentes se utilizó el ensayo de fluorescencia de rayos X (FRX). El estudio concluye que estadísticamente existen diferencias en las concentraciones de  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$  de los lodos y el cemento tipo portland. Además, el lodo B es el que podría tener mayor potencial como sustituto de una parte del cemento en la fabricación de diferentes materiales de construcción. En contraposición el lodo A es candidato para reemplazar el agregado fino de las mezclas de mortero y concreto. (Pereira et al., n.d.)

Ahmad T. (2016) realizó un análisis físico – químico a muestras representativas de lodos provenientes de la planta de tratamiento de agua en Ghaziabad, India. La investigación consistió en el desarrollo de una ruta de eliminación segura de residuos conocidos como lodos de tratamiento de agua (WTS) provenientes de plantas de tratamiento de agua (WTP), por medio de la fabricación de ladrillos, cerámica, cemento y materiales de cemento logrando sustituir parcialmente los materiales de construcción tradicionales. Las muestras recolectadas se analizaron para determinar los parámetros físico- básicos como el pH y el contenido de humedad. La distribución de los tamaños de grano se analizó por medio de ensayos de tamizado e hidrómetro. Para el análisis químico de las muestras representativas se utilizaron las técnicas de fluorescencia de rayos X de dispersión de energía (ED-XRF) y técnica de fluorescencia de rayos X de dispersión de longitud de onda (WD-XRF). Los resultados de este estudio demostraron que los lodos producidos en Ghaziabad contienen 60% de arena fina, 24% de limo y 16% de arcilla. Los contenidos de sílice, alúmina, cal y óxido férrico son de 52.78%, 14.38%, 5.20%, 4.39%

respectivamente. Los compuestos químicos como el plomo, arsénico, bario y cromo están presentes en concentraciones considerables. La industria de la construcción tiene un mercado creciente en India, por lo tanto; la utilización de lodos / residuos de las WTP también evitaría la explotación excesiva de las materias primas y allanaría el camino para el desarrollo sostenible. (Ahmad, 2016)

Gómez K. (2018) utilizo en su investigación muestras de lodos de la planta de tratamiento de agua (WTP) de Tamandúa, Brasil. Para ser considerados en un proceso de reutilización para la fabricación de concreto en la industria de la construcción civil. Realizaron análisis de lodos húmedos en su forma natural, los cuales incluyeron; determinación de sólidos totales, contenido de humedad, densidad, pH y parámetros inorgánicos (As, Al, Ba, Cd, Pb, Cr, F, Hg, Ag y Se) por medio de análisis termo gravimétricos y difracción de rayos X. Para el lodo calcinado, se evaluó la composición química y mineralógica y granulométrica laser. Los resultados indicaron que el lodo calcinado tenía el potencial de ser utilizado en la producción de materiales de cemento; por el contrario, los lodos húmedos no alcanzaron los estándares de seguridad adecuados debido a la alta cantidad de materia orgánica. (Gómez, 2018)

Ahmad T. (2018) realizo un análisis físico químico de lodos clarifloculadores (SFC) provenientes de plantas de tratamiento de agua potable, para investigar de forma selectiva los SFC y sus características. Estos utilizaron técnicas como el análisis granulométrico por medio de tamices, así como los ensayos de XRF, SEM, DRX, FTIR y TG-DTA. Los resultados del estudio mostraron que los lodos están constituidos en un 78% de arena fina y el porcentaje restante de limo y arcilla. Por medio de los ensayos químicos se determinó que la sílice, la alúmina, la cal y el óxido férrico constituyen la composición química principal de estos. El porcentaje total de  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  cumple estándares requeridos para ser caracterizado como puzolana.

Específicamente los ensayos SEM, XRD y FTIR muestran que el cuarzo es el principal mineral cristalino presente en el lodo. Así mismo el estudio concluye que la materia volátil con solo un 0.85% indica que la fracción orgánica presente es baja. Existe la necesidad de canalizar adecuadamente los SFC y reciclarlo en la industria de la construcción, lo que podría ser una opción de eliminación segura. (Ahmad, 2018)

(Bohórquez González et al., 2020b) realizó un estudio enfocado en la investigación de las propiedades de las cenizas de lodo provenientes de una planta de tratamiento de agua potable, dicho estudio quería buscar el reemplazo de las cenizas como material cementante complementario. En la investigación se desarrollaron morteros hidráulicos con diferentes niveles de reemplazo del cemento por las cenizas de lodo en un 10% y 30% en peso, las cenizas contaban con dos diferentes temperaturas de calcinación (600 °C y 800 °C). La caracterización de estas cenizas se realizó mediante ensayos de XRF, XRD, distribución del tamaño de partícula (difracción de rayos láser), resistencia a la compresión y SEM-EDS.

Con los resultados de la investigación se evidencio que  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  componen el 90% de la ceniza de lodo, el cual cuenta con una actividad puzolánica potencial. Así mismo se evidencio que existe influencia significativa de la relación variable de cenizas de lodo: cemento en la resistencia a la compresión de las muestras de mortero sobre otras variables. En general, este estudio mostró que las cenizas de lodo podrían considerarse una alternativa viable y sostenible para el sector de la construcción. A pesar de los beneficios del reemplazo sugerido, la presencia de  $\text{SiO}_2$  amorfo requiere una revisión del comportamiento químico a largo plazo.

(Bohórquez González et al., 2020b)

## Metodología

Para el desarrollo de este proyecto de investigación, se realizó la toma de lodos de la planta de tratamiento de agua potable “Las Flores” de la empresa de acueducto y alcantarillado Triple A, en Barranquilla. En la figura 16 se observa la ubicación de la planta en la ciudad de Barranquilla, Colombia. Posterior a la toma de lodos una cantidad de muestra fue sometida a secado a la intemperie con un tiempo de 72 horas a una temperatura ambiente de 36 °C y otra cantidad fue sometida a calcinación a 800 °C.

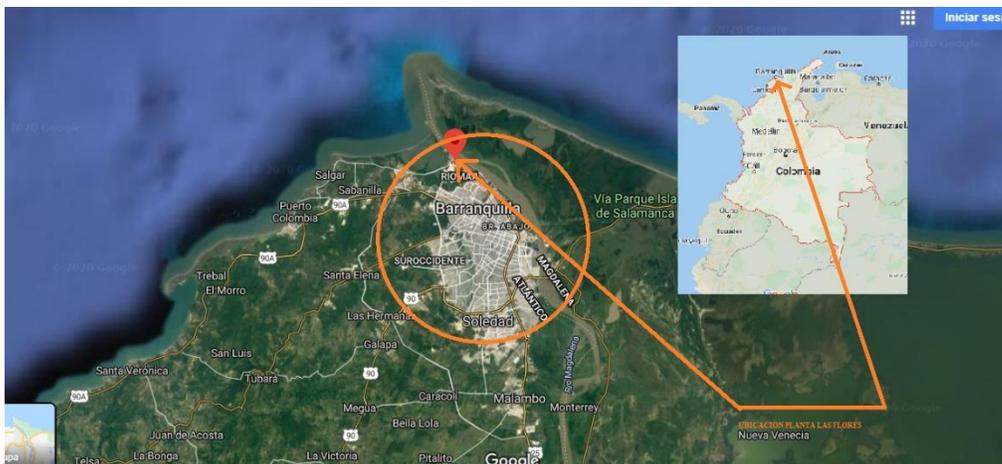


Figura 16. Ubicación Planta de Tratamiento "Las Flores" TRIPLE A. Fuente: Google Maps. Edición de autor.

Una vez obtenidas las muestras, se realizaron distintas caracterizaciones que se explicaran a continuación.

## Caracterización física

### Ensayo de densidad

El ensayo de densidad se realizó en el laboratorio de Tecnología de Materiales de la Universidad de la Costa, Barranquilla, Siguiendo los lineamientos de la NTC 221 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2011), que describe el método para determinar la densidad del cemento hidráulico.

El procedimiento del ensayo se inició con el llenado del frasco de Le Chatelier con queroseno hasta un punto situado entre las marcas de 0 y 1 ml. Se tomó la lectura inicial con el frasco y el contenido dentro del frasco, con una temperatura de  $23 \pm 2$  °C, evidenciado en la figura 17, donde se encuentran llenados con queroseno los frascos de Le Chatelier.



Figura 17. Frasco de Le Chatelier para Ensayo de Densidad Fuente: Porras Karla, Vizcaino Armando.

Posteriormente se introdujeron 64 gr del lodo, hasta que el nivel del queroseno se elevara a un punto superior de la graduación, en la figura 18 se observa el pesaje de la muestra para el ensayo de densidad.



Figura 18. Muestra para Ensayo de Densidad Fuente: Porras Karla, Vizcaino Armando

Se colocó el tapón en el frasco y se giró este en una posición inclinada, con el fin de que se desalojara todo el aire atrapado. Se tomó la lectura final con el frasco y el contenido,

asegurándose que la temperatura no hubiera variado más de 1°C con respecto a la temperatura original. El procedimiento se realizó para las dos muestras; lodos y cenizas de lodo, la figura 19 muestra los frascos marcando el volumen final de los frascos con los lodos y cenizas de lodo.



Figura 19. Queroseno y Muestra, Ensayo de Densidad Fuente: Porras Karla, Vizcaino Armando

### **Ensayo de finura**

La finura es una propiedad importante que se debe considerar cuando los elementos son utilizados para mezclas de concreto o mortero, como el cemento. El parámetro de medición de la finura es conocido como el área específica, que se expresa como el área total que se encuentra en un  $\text{cm}^2$  por gramo. Cuando se hace referencia a  $\text{cm}^2/\text{gr}$  se habla de la cantidad de superficie que un gramo de las partículas de un determinado sólido (en este caso el cemento) puede cubrir. Si se cuenta con un cemento que tenga un área específica mayor, quiere decir que es más fino que un cemento con un área específica menor.

El ensayo de finura fue realizado en las instalaciones de la Universidad de la Costa, bajo la Norma Técnica Colombiana NTC 226 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación - INCONTEC, 2013), utilizada como método de ensayo para determinar la finura del cemento hidráulico por medio de los tamices No. 200 y No 100. La figura 20 muestra el tamiz No. 100 y No 200, los cuales son los especificados por la Norma NTC 226 para la realización del ensayo. Para esto se llevó a cabo el siguiente procedimiento:



Figura 20. Tamices para Ensayo de Finura, Fuente: Porras Karla, Vizcaino Armando.

Se colocó 50 gr de muestra en el tamiz N 100, con el fondo colocado. Teniendo en cuenta que el tamiz debía estar en condiciones óptimas para el ensayo y los movimientos empleados en este procedimiento deben ser suaves, hasta conseguir que la mayoría del material fino haya pasado, buscando así que el residuo tuviera una apariencia limpia, en la figura 21 se observa el pesaje de ceniza de lodo para la realización del ensayo de densidad.

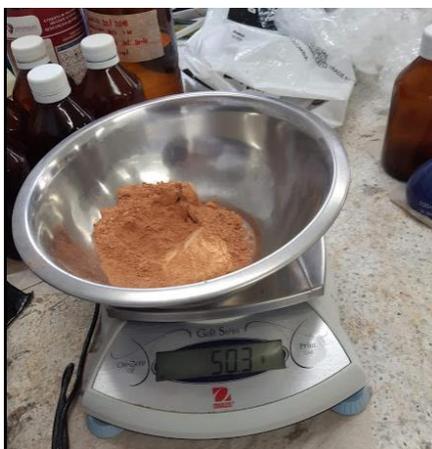


Figura 21. Muestra y Tamices para Ensayo de Finura, Fuente: Porras Karla, Vizcaino Armando.

Se colocó la tapa y se retiró el fondo, y golpeándolo suavemente por un lado con el mango de la brocha empleada para limpiarlo, se retiró el polvo adherido al tamiz para garantizar la parte inferior limpia, luego de realizar este procedimiento se desocupó el fondo y se colocó nuevamente en el tamiz

Una vez garantizada la limpieza de la muestra, se continuo el tamizado sin la tapa, teniendo en cuenta la intensidad de los movimientos y tratando que el residuo se mantuviera extendido sobre todo el tamiz.

Se realizó este procedimiento durante aproximadamente 1 minuto, donde el tamiz, el fondo y la tapa se sujetaron con la mano, en posición ligeramente inclinada con movimientos de atrás hacia adelante añadiendo golpes simultáneos con la palma de la otra mano

Se continuó con el tamizado hasta que no pasaron más de 0,05 g en 1 min de tamizado continuo, luego de esto se transfirió todo el residuo a la balanza, cepillando ambos lados del tamiz para garantizar que este fuera removido en su totalidad.

### **Difracción de rayos laser**

El ensayo de difracción de rayos láser fue realizado en las instalaciones de la Universidad de Antioquia. El estudio se llevó a cabo utilizando un equipo Máster sizer 2000E que consta de un rango de medida entre 0,1  $\mu\text{m}$  y 1750  $\mu\text{m}$ . Las muestras pulverulentas se mantuvieron en suspensión 10 minutos para eliminar las fuerzas de Van der Waals y electrostáticas entre las partículas, antes de su introducción en el equipo. Al utilizar las cenizas de lodos como una adición en un material cementante, se realizó la valoración de la fracción granulométrica de la ceniza de lodo y se llevó a cabo una comparación de la granulometría de la ceniza de lodo utilizada en la investigación con los requerimientos físicos de la norma Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete ASTM C618–05. (Bohórquez y Pacheco, 2017)

## Caracterización química

### Difracción de rayos X (DRX)

Los ensayos de DRX se realizaron en las instalaciones de la Universidad de Antioquia, utilizando el equipo PANalytical, con las configuraciones que se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2.

*Configuración del Equipo PANalytical*

Configuraciones Equipo PANalytical	
Sistema de Difractometro:	EMPYREAN Modelo 2012
Goniómetro:	Omega/2 theta
Configuración de la plataforma:	Reflexion Transmission Spinner
Fuente:	Cobalto (1.7903 A)

Fuente: Porras Karla, Vizcaino Armando

La semicuantificación se realizó usando el software high Score Plus mediante el método Rietveld y la base de datos: ICSD FIZ Karlsruhe 2012-1. Para la realización de los ensayos se enviaron muestras de aproximadamente 1 g, cada una. Las condiciones de análisis se basaron en un ángulo  $2\theta$  entre  $5^\circ$  y  $80^\circ$ , con un paso de  $0.026^\circ$ .

Con la realización de los ensayos se buscó determinar los principales tipos de materiales cristalinos presentes en las muestras de lodos en base seca de lodos y cenizas de lodos, de los cuales se obtuvieron dos difractogramas (lodo y cenizas de lodo a  $800^\circ\text{C}$ ).

### Método Chapelle

El método de Chapelle, es un método directo para la determinación del consumo de puzolana Cal. Para la realización de este ensayo se llevó a cabo el siguiente procedimiento:

Se mezcló un gramo de óxido de calcio con un gramo del material puzolánico. La figura 22 y 23 las muestras de ceniza de lodo que se utilizó en el ensayo.



Figura 22. Muestra de ceniza de Lodo. Fuente: Porras Karla, Vizcaino Armando.



Figura 23. Muestra de ceniza de lodo para calcinar. Fuente: Porras Karla, Vizcaino Armando.

Se añadió 250 ml de agua en un envase plástico Erlen Meyer, tal y como se muestra en la Figura 24. La mezcla obtenida y un espacio en blanco se mantuvieron a  $90 \pm 5^\circ \text{C}$  en un baño de dunoff, durante 16 horas, con barras de teflón y bolas pequeñas de acero inoxidable.



Figura 24. Envase Erlen Meyer, Fuente: Porras Karla, Vizcaino Armando.

Después de enfriar, se añadió 250 ml de una solución sacarosa y se agito durante 15 minutos, como se observa en la Figura 25.



Figura 25. Solución Sacarosa, Fuente: Porras Karla, Vizcaino Armando.

- Se filtró a través de un papel de filtro pisado con una alícuota de 50 ml, el resultado se expresa en miligramos de CaO reaccionado de cal (CaO).



Figura 26. CaO Reaccionado, Nota: Fuente: Elaboración propia Porras Karla, Vizcaino Armando.

### **Fluorescencia de rayos X**

El ensayo de fluorescencia de rayos X, fue realizado utilizando el equipo Epsilon 3Lp Panalytical. Este ensayo se realizó con el fin de determinar la composición química de cada una de las muestras que se encontraban en forma pulverulenta, la muestra contaba con granos finos

de material mono cristalino, empleando el equipo de prensado Fluana Vaneox modelo PR-25m. (Bohorquez y Pacheco, 2017). La figura 27 muestra el equipo FRX Fulxana Vaneox empleado para el desarrollo del ensayo.



Figura 27. Equipo Empleado para FRX Fulxana Vaneox modelo PR-25m. Fuente: Elaboración de: (Bohórquez y Pacheco, 2017) Pág. 18

## **Caracterización microscópica**

### **Microscopía electrónica de barrido (SEM)**

La caracterización microscópica, se realizó en el laboratorio de la Universidad de Antioquia mediante un microscopio electrónico de barrido (SEM), JSM-6490LV el cual, es un microscopio electrónico de barrido versátil y de alta resolución: de 3.0 nm en el modo de alto vacío y 4.0 nm en el modo de bajo vacío. El modo de bajo vacío permite la observación y análisis de muestras no conductoras, húmedas o no compatibles con el alto vacío, teniendo en cuenta que las muestras debían estar completamente secas, el proceso de secado debió realizarse preservando al máximo la estructura original de la muestra.

Una vez garantizado esto, se procedió a recubrir las muestras con una capa de un material conductor la cual permitió su observación correcta a través del microscopio.

**Resultados y discusión**

**Caracterización Física**

**Ensayo de densidad**

La Tabla 3 muestra los resultados obtenidos del ensayo de densidad, teniendo en cuenta que para cada muestra se realizaron 3 ensayos, se muestran los resultados obtenidos en cada uno de los procedimientos realizados y los cálculos de volumen desplazado (cm<sup>3</sup>) y la densidad (g/cm<sup>3</sup>), estos cálculos fueron realizados bajo la normatividad establecida en la NTC 221.

Tabla No. 3

*Resultados Experimentales ensayo de densidad*

Muestra	Masa de material (gr)	Vol. Inicial (Cm3)	Vol. Final (cm3)	Vol. Desplazado (cm3)	Densidad (gr/cm3)
<b>Lodo</b>	64.00	0.10	23.90	23.80	2.69
<b>Ceniza de lodo</b>	64.00	0.10	23.60	23.50	2.72
<b>Lodo</b>	64.00	0.10	23.80	23.10	2.77
<b>Ceniza de lodo</b>	64.00	0.10	23.80	22.90	2.79
<b>Lodo</b>	64.00	0.10	23.70	22.90	2.79
<b>Ceniza de lodo</b>	64.00	0.10	23.50	23.00	2.78

Nota: Fuente: Elaboración propia Porras Karla, Vizcaino Armando

La tabla 4 muestra los resultados obtenidos de densidad y densidad relativa para las muestras de lodo y ceniza de lodo.

Tabla No. 4

*Resultados Obtenidos Densidad y Densidad Relativa*

Toma	Muestra	Densidad (gr/cm3)	Densidad relativa
1	<b>Lodo</b>	2,69	2,69
	<b>Ceniza de lodo</b>	2,72	2,72
2	<b>Lodo</b>	2,77	2,77
	<b>Ceniza de lodo</b>	2,79	2,79
3	<b>Lodo</b>	2,79	2,79
	<b>Ceniza de lodo</b>	2,78	2,78
<b>Desviación estandar</b>	<b>Lodo</b>		0,06
	<b>Ceniza de lodo</b>		0,04

Nota: Fuente: Porras Karla, Vizcaino Armando.

Los valores de densidad nominal entre las dos muestras fueron muy cercanos, teniendo en cuenta que estos resultados presentaron entre si una desviación estándar mínima, lo que representa una dispersión baja entre estos. Los resultados obtenidos para la muestra de lodo secada a temperatura ambiente en todas las tomas presentó una densidad menor que la muestra calcinada a 800°C, basado en esto y teniendo en cuenta que la densidad es una de las características físicas principales definidas de cualquier material, que busca categorizar los materiales, el valor de densidad hace referencia a la cantidad de masa que presenta un cuerpo, es decir, es la relación de la masa de un cuerpo y el volumen que dicho cuerpo ocupa. El método de calcinación es una alternativa eficiente en cuanto a la reducción del volumen de lodos con valores 95,17% para las muestras de alta humedad y un 82,02% para muestras de baja humedad. (Quintero & Roa, 2016) La densidad de la ceniza de lodo es mayor que la del lodo y la razón de esto es la disminución del volumen que se presenta por la calcinación, sabiendo que cuando un cuerpo ocupa un menor volumen su densidad es mayor.

Teniendo en cuenta la literatura se encontró distintos valores obtenidos para la densidad del cemento portland tipo 1, entre los cuales se tiene Cemento Argos tipo I, cemento Boyacá tipo I, cemento Cemex tipo I y cemento Tequendama Tipo I, con unos valores promedio de densidad de 2,94 gr/cm<sup>3</sup>, 2,73 gr/cm<sup>3</sup>, 2,84 gr/cm<sup>3</sup>, 2,98 gr/cm<sup>3</sup>, respectivamente. (Cortes Perilla, 2014), la figura 28 representa los valores de densidad obtenidos tanto para los diferentes tipos de cemento, como para las dos muestras evaluadas, se evidencia que los valores obtenidos para la ceniza de lodo y el lodo poseen una densidad mayor únicamente que la densidad del cemento Boyacá, los cementos Argos, Cemex y Tequendama, presentan valores de densidad muy superiores al lodo y ceniza de lodo, teniendo en cuenta que el material cementante con mayor densidad es el cemento Tequendama. (Cortes Perilla, 2014).

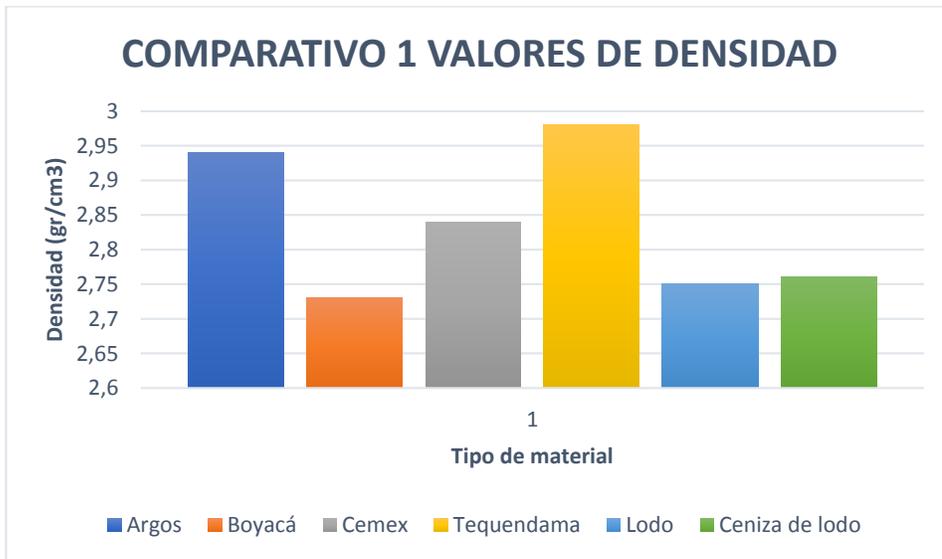


Figura 28. Comparativo 1 de Densidades. Fuente: Porras Karla, Vizcaino Armando.

Según un estudio realizado por la universidad Centroamericana José Simeón Cañas, donde se estableció la densidad del cemento portland I según la norma AASTHO T-133, el resultado obtenido para este fue de 3.18 g/cm<sup>3</sup>. (Cañas, 2013)

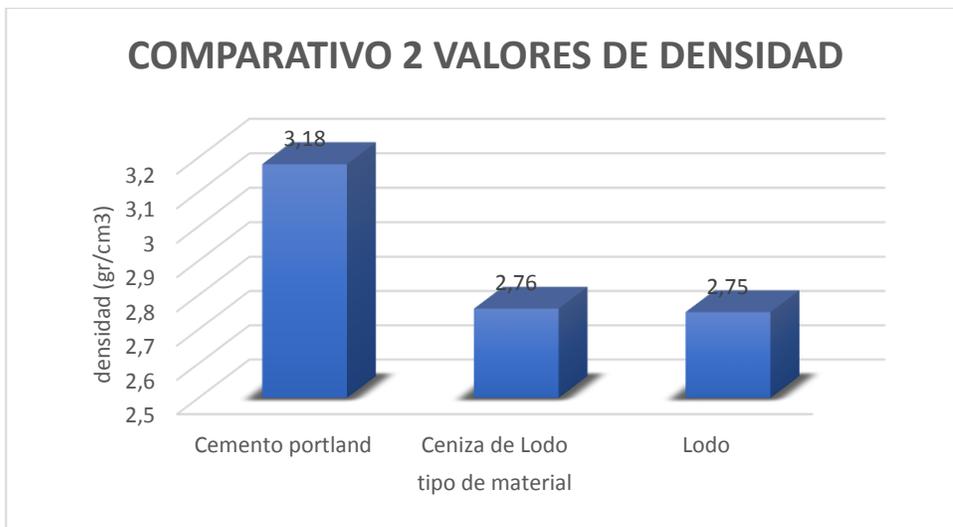


Figura 29. Comparativo 2 de Densidades. Fuente: Porras Karla, Vizcaino Armando.

La figura 29 representa los valores de densidad obtenidos para el cemento portland según la literatura y los valores obtenidos de forma experimental para las muestras de lodo, donde se observa que estas presentan unos valores de densidad similares, pero ambas difieren de la densidad obtenida para el cemento portland tipo I, entre 0,42 y 0,43 gr/cm<sup>3</sup>.

### Ensayo de finura

La tabla No. 5 representa los resultados experimentales obtenidos de la realización del ensayo de finura a cada una de las muestras, para esto se realizaron dos tomas por muestra, empleando el tamiz 150  $\mu\text{m}$  (No. 100), según lo establecido en la NTC 226.

Tabla No. 5

#### *Resultados Experimentales Ensayo de Finura*

Toma	Peso muestra (gr)	Pasa tamiz	Retenido	% Pasa Tamiz	% Retenido	Finura %
<b>Lodo</b>	50	27.6	22.4	55.02	44.8	55.2
	50	28.4	21.6	56.8	43.2	56.8
<b>Ceniza de Lodo</b>	50	27.4	22.6	54.08	45.2	54.8
	50	27.5	22.5	55.00	45	55

Nota: Fuente: Elaboración propia Porras Karla, Vizcaino Armando.

Teniendo en cuenta los porcentajes de finura obtenidos en cada una de las tomas realizadas a cada una de las muestras, se puede observar que el lodo secado a temperatura ambiente tiene un mayor porcentaje de finura, que el lodo calcinado a 800°C, lo que se puede atribuir a la diferencia en las condiciones de exposición, evaluando que la finura representa la cantidad de superficie que un gramo de partículas puede cubrir.

### Ensayo difracción de rayos laser

Para esta investigación se utilizaron las mismas cenizas de lodos del trabajo de (Bohórquez y Pacheco, 2017), las cenizas que fueron obtenidas por la incineración del lodo a 800 °C presentan un color parduzco rojo, y el análisis permitió demostrar que el diámetro de las

partículas se encuentra entre los 1  $\mu\text{m}$  y 1000  $\mu\text{m}$ . El porcentaje en volumen de las partículas cenizas de lodo se muestran en la tabla 6. La Tabla 6 muestra la dispersión del tamaño de partícula para la ceniza de lodo a 800°C.

Tabla 6.

*Dispersión de Tamaño de Partícula Ceniza de Lodo a 800 °C*

Ceniza de lodo calcinado a 800 °C			
			Residual %
d(0.1): 6.138 $\mu\text{m}$	d(0.50): 98.217 $\mu\text{m}$	d(0.90): 570.860 $\mu\text{m}$	0,650

Nota: Fuente: (Bohórquez y Pacheco, 2017).

De la tabla 6 se obtiene información de distribución de la partícula, donde:

- El 10% en volumen de las partículas analizadas presentan un diámetro inferior al 6.138 $\mu\text{m}$ .
- El 50% en volumen de las partículas analizadas presentan un diámetro inferior de 98.217 $\mu\text{m}$ .
- El 90% en volumen de las partículas analizadas presentan un diámetro inferior de 570.860 $\mu\text{m}$ .

En la comparación de los datos que fueron obtenidos de la distribución de tamaño de partículas con los requerimientos establecidos en la norma ASTM C 618 – 05, donde se indica que la cantidad retenida en el tamiz de 45  $\mu\text{m}$  (N° 325), no puede ser mayor a 34%, se encontró que el 35.915% en volumen de las partículas de ceniza de lodo analizadas presentan un diámetro de 45  $\mu\text{m}$ , superando en un 1.915% la cantidad indicada por la norma ASTM C 61 – 95 (Bohórquez y Pacheco, 2017).

Cuando se realicen mezclas de concreto o de mortero, será necesario un mayor requerimiento de agua debido a la mayor finura de partículas que presentan la materia puzolana,

de igual manera si se tiene el un diámetro de partículas mayor se presenta una densidad de mezcla de mortero o concreto menor.

### Caracterización química

#### Ensayo difracción de rayos X (DRX)

En las figuras 28 y 29, se muestra el difractograma obtenido para el lodo y ceniza de lodo. El análisis de DRX muestra la presencia fases amorfas combinadas con fases cristalinas en; los cuales se encuentran principalmente compuestos por Cuarzo e Ilita 2M1 respectivamente. Los difractogramas resultados del ensayo permiten determinar las fases y las composiciones de minerales presentes en las mezclas de lodos.

El difractograma de la figura 30 muestra que los principales componentes en el lodo es el cuarzo (34.3%), Ilita (29.4%) y Caolinita 1A (21.7%). Así mismo cuenta con pequeñas cantidades de Anortita sódica (10.9%) y Vermiculita (3.7%).

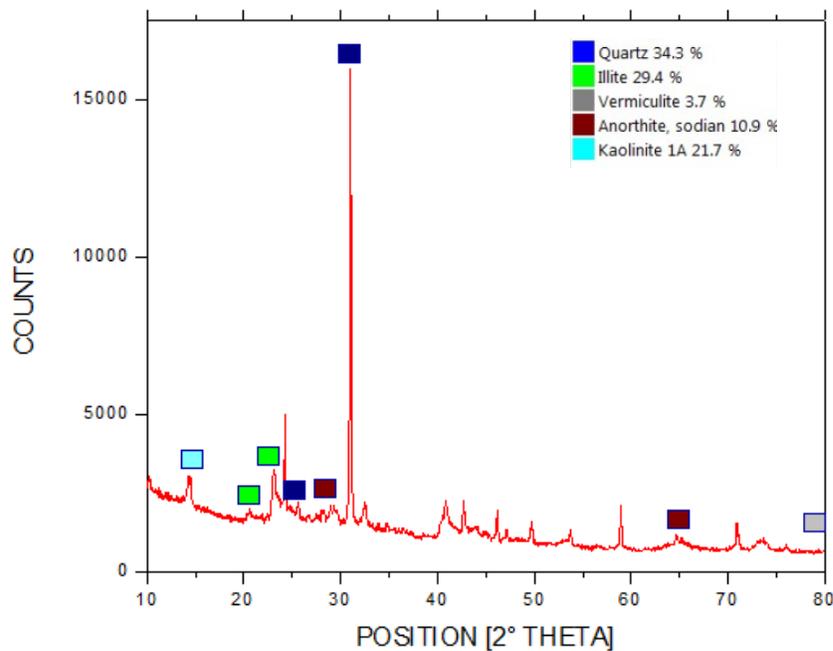


Figura 30. Difractograma de Lodo. Fuente: Porras Karla, Vizcaino Armando.

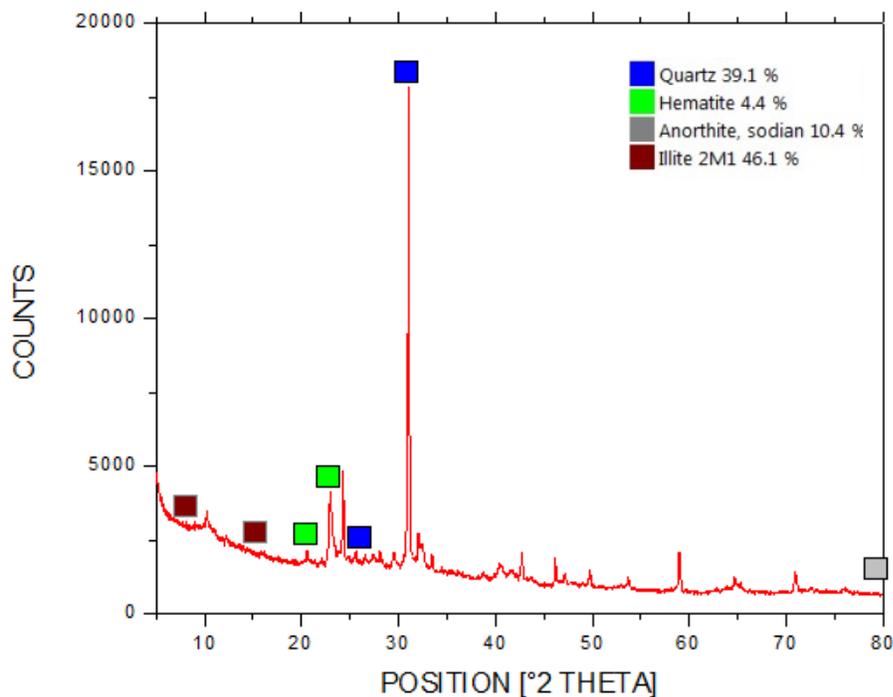


Figura 31. Difractograma Ceniza de lodo. Fuente: Porras Karla, Vizcaino Armando

La figura 31 muestra el difractograma de cenizas de lodo a 800 °C donde se evidencia que los compuestos con mayor porcentaje son illita 2M1 (46.1%) que solo se encuentra presente en el lodo calcinado y el cuarzo (39.1%) aumentando su porcentaje en 4.9% con respecto al lodo. Por otra parte, posee porcentajes menores de anortita sódica (10.4%) que disminuyó 0.5% con respecto al lodo y hematita (4.4%). El perfil de difracción muestra además la ausencia de illita, canoilita y vermiculita, compuestos que se encuentran presentes en el lodo sin cenizar.

La variación presente de cuarzo de 4.9% entre las dos muestras, se puede atribuir a la absorción de los diferentes compuestos minerales expuestos en la muestra. De igual manera se presenta la disminución de la anortita sódica de 0.5%.

Tabla 7

*Compuestos Presentes en la Muestra de Lodo y Ceniza de Lodo.*

Componente	Lodo sin cenizar	Lodo cenizado
Cuarzo $O_2Si_1$	34.3	39.1
Ilita $H_2Al_{2.59}Ca_{0.01}Fe_{0.04}K_{0.71}Mg_{0.15}Na_{0.01}O_{12}Si_{3.27}$	29.4	-
Canoilita $H_8Al_4O_{18}Si_4$	21.7	-
Anortita sodica $Al_{1.55}Ca_{0.55}Na_{0.45}O_8Si_{2.4}$	10.9	10.4
Vermiculita $H_{10.8}Al_{2.94}Ca_{0.06}Fe_{0.44}Mg_{5.68}Na_{0.04}O_{27.4}Si_{5.66}Ti_{0.042}$	3.7	-
Hematita $Fe_2O_3$	-	4.4
Ilita 2M1 $H_3Al_4K_1O_{12}Si_2$	-	46.1

Nota: Fuente: Elaboración Propia Porras Karla, Vizcaino Armando.

La tabla 7 representa la comparación entre los resultados de lodo sin cenizar y lodo cenizado, en esta se evidencia que el lodo sin cenizar se encuentra compuesto principalmente por Canoilita 1A, Ilita y Cuarzo. Mediante la calcinación se genera pérdida de humedad y reacomodamiento de la estructura química de la mezcla, lo que genera la formación de minerales nuevos estables, tales como Ilita 2M1, que es asociada a Canoilita de alta cristalinidad, venulaciones y vetillas de Cuarzo.

Los compuestos que contienen Canoilita e Ilita al ser calentados a una temperatura aproximada de 580 °C siguen un proceso de descomposición que terminan en la formación de una fase cristalina dura y químicamente resistente conocida como Ilita 2M1. La variación del compuesto Ilita 2M1 hace referencia al politismo del mineral, en su ordenamiento estructural y vacancias, los cuales se encuentra que una de las láminas es octaédrica y está en medio de dos laminas tetraédricas, entre estas las láminas se generan espacios donde ingresan iones haciendo así una arcilla expansiva (Figueiredo, 1986).

Por otro lado, la aparición de hematita en las cenizas de lodo es el responsable del proceso de coloración en presencia del oxígeno  $Fe_2O_3$  no confiere fusibilidad a las arcillas, sin

embargo, en ambientes no oxidantes actúa como un poderoso fundente en su forma reducida FeO (Angelica & Tuebjn, 1999). Conjuntamente se puede observar un aumento porcentual del 4.8% en el mineral Cuarzo, este aumento se atribuye a la transformación de fase Cuarzo  $\alpha$  a Cuarzo  $\beta$  que padece este mineral a una temperatura de 578 °C (Florez Arenas, 2016).

Finalmente, la Anortita Sodica es utilizada como un fundente que importa piroplasticidad y contribuye a la formación de nuevas fases cristalinas, se conoce como feldespatos y su acción fundente actúa fundiendo partículas que reaccionan químicamente con ella (Florez Arenas, 2016).

(Bohórquez & Pacheco, 2017) realizaron análisis de DRX a muestras de Lodo y Ceniza de Lodo, el análisis de DRX reportó fases amorfas y picos con fases cristalinas. En la composición de las muestras se evidenciaron minerales como el cuarzo y la alúmina que no causan problemas de expansión al mezclarse con el cemento. El análisis en la muestra de lodo determinó que los principales minerales presentes son el Cuarzo con un (89.9%), Alúmina (5.1%), Eskolita (2%), Fluorita (1%), Hematita y Calcita (1%). En comparación con nuestro estudio solo se tiene en común el Cuarzo, siendo el material predominante en las dos muestras, los demás minerales no se encuentran presentes en nuestro análisis. La muestra de ceniza de lodo de igual manera presenta mayor porcentaje de Cuarzo en similitud con nuestro estudio y se determinó que no se encuentra presente la calcita, debido a que se descompone cercano a los 800 °C. (Merino et al, 2005).

### **Actividad Puzolánica**

De acuerdo con la revisión bibliográfica realizada, la actividad puzolánica es una propiedad fundamental de este tipo de materiales, la cual para su selección deben ser considerados ciertos factores, tales como: su composición mineralógica, que influye no solo en

constituyentes activos, sino en avidez por el agua, el cual tiene una relación directa con la resistencia de morteros y hormigones. (Rizo & Lavernia, 2002)

La tabla 8 representa los datos obtenidos de actividad puzolánica para las cenizas de lodo. Se observan los resultados establecidos como máximos, medios y mínimos, a su vez representa el aumento del consumo de óxido de calcio obtenido a través del ensayo realizado, y establece el consumo como hidróxido de calcio ( $\text{CaO} \times 1,32$ ) establecidos como  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .

Tabla 8

*Consumo de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  mg/g de muestra.*

<b>Prueba con 1 g de CaO</b>		
<b>Consumo de calcio</b>	<b>CaO mg/g de muestra</b>	<b>Ca (OH)<sub>2</sub> mg/g de muestra</b>
Maximo	1498,22	1977,7
Medio	1475,26	1947,3
Minimo	1201,2	1585,6
Promedio		1836,9
Desviación estandar	165,26	

Nota: Fuente: Elaboración Propia Porras Karla, Vizcaino Armando.

Estos resultados corresponden a la muestra calcinada a 800°C, los cuales permiten evidenciar una variación alta entre estos, teniendo en cuenta que el valor máximo y mínimo obtenido para el consumo de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  mg/g de muestra es de 1585,6 y el valor máximo es de 1977,7. Siendo establecido como valor promedio y de referencia 1836,9

De acuerdo con la literatura la caracterización de las cenizas de lodos permite a estos residuos ser utilizados como sustituto de cemento en la industria de la construcción, según lo establecido en investigaciones previamente realizadas donde la sustitución entre el 1% y 5% de ceniza volante en la mezcla de diseño evidencio resultados óptimos en la resistencia a la compresión (Altoandinas, 2018). Al igual que la sustitución del 5% y 10% de cemento por

cenizas provenientes de PTAP mostro valores de resistencia a la compresión de 22,39 MPa y 23,82 MPa, respectivamente, siendo estos considerados como favorables (Lodo et al., 2019).

Los resultados de (Bohórquez & Pacheco, 2020) también evidencian dicho comportamiento, por tanto, se describe que es posible conseguir la misma fuerza observada en el hormigón, reduciendo así el consumo de cemento por 37-200 kg /m<sup>3</sup> en hormigón, con la incorporación de cenizas de lodos. (Bohórquez & Pacheco, 2020) El resultado obtenido 1836,9 mg de Ca(OH)<sub>2</sub>, es mayor que el límite mínimo establecido por Raverdy con un valor de 436 mg de Ca(OH)<sub>2</sub> (Bohórquez & Pacheco, 2020), lo cual clasifica a esta ceniza de lodo como puzolánica.

Las puzolanas pueden tener un efecto físico sobre el cemento, que está relacionado directamente con el tamaño, forma y textura de las partículas de puzolana, las cuales repercuten directamente sobre la densidad de empaquetamiento del cemento (Ruíz, 2015), teniendo en cuenta la importancia del cemento en la actualidad, el estudio de este es fundamental pues para lograr su obtención se generan altos índices de emisiones de dióxido de carbono, por tanto el estudio de materiales cementantes suplementarios puede considerarse como un objeto de estudio importante, considerando que estos materiales pueden generar un efecto positivo sobre el desempeño del cemento, las puzolanas por su composición química no poseen propiedades cementantes, pero son materiales que al estar finamente divididos y en presencia de agua reaccionan a temperatura ambiente con el hidróxido de calcio, el cual se presenta en la hidratación del cemento, logrando así formar cementantes adicionales (Ruíz, 2015)

### Fluorescencia de rayos X

La composición química inicial y de calcinación del lodo fue determinada usando FRX como técnica instrumental. Los resultados analíticos de las muestras se representan con oxígeno o elementos químicos puros y está formado principalmente por  $\text{SiO}_2$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , el resto de los óxidos muestran valores porcentuales mínimos.

La fracción mineral de la muestra del lodo está constituida mayormente por Cuarzo (34.4%), Illita (29.4%), Vermiculita (3.7%), Anortita Sodica (10.9%) y Caolinita 1A (21.7%)

En la tabla 9 se observan los óxidos y sus porcentajes presentes en las muestras, evidenciando la presencia de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ , que son conocidos como materiales cementantes, compuestos que se observaron en los resultados del ensayo de difracción de rayos X (DRX) como se observa en la tabla 7.

Tabla 9

*Compuestos Presentes en la Muestra de Lodo y Ceniza de Lodo.*

Oxido	Lodo	Ceniza de Lodo
	Masa en %	
$\text{SiO}_2$	60,9155	60,3075
$\text{Al}_2\text{O}_3$	19,717	20,121
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	11,5885	10,8715
$\text{K}_2\text{O}$	2,416	2,1275
$\text{CaO}$	1,481	1,991
$\text{MgO}$	1,4705	1,269
$\text{TiO}_2$	0,9635	0,916
$\text{SO}_3$	0,227	0,2005

Nota: Fuente: (Bohórquez y Pacheco, 2017) Pág. 24.

La norma ASTM C618 – 05, especifica que para que las cenizas de lodo sean catalogadas como un material puzolana de clase N (origen natural), la sumatoria en porcentaje de los óxidos

( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ) debe ser mínimo de 70%. El ensayo demostró que la sumatoria de estos óxidos es de aproximadamente 90%, por lo tanto, las cenizas de lodo a 800 °C se pueden catalogar como puzolana de clase N.

La cantidad de  $\text{CaO}$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$  presente en el lodo es de 1.481% y de 19.717% respectivamente, luego del proceso de incineración estos compuestos aumentaron a 1.991% y 20.121% respectivamente. El azufre, identificado como  $\text{SO}_3$  estuvo presente en la muestra de lodo con un 0.227% mientras que en las cenizas de lodo a 800 °C se presentó una disminución de azufre hasta el 0.2005%, lo que puede aportar mejores propiedades del lodo para ser utilizado en mezclas de concreto y/o morteros. Las cantidades elevadas de azufre causan problemas de expansión en las mezclas como; expansiones internas que se derivan en grietas y fisuras. (Bohórquez y Pacheco, 2017)

Para establecer el límite de óxido de hierro en muestras como posibles sustituyentes del cemento, se realizó una comparación con la NTC 31 “Ingeniería Civil y Arquitectura. Cemento Portland. Especificaciones Químicas”, en el cual la tabla 3 establece que el límite en porcentaje de óxido de hierro para el cemento portland es de 6,0. El análisis de fluorescencia de rayos X, establece valores de 11,5885 y 10,8715 para las muestras de Lodo y Ceniza de Lodo respectivamente, por lo cual se considera que los óxidos superan el límite establecido por la NTC 31. Los efectos del óxido de hierro, que también es conocida en su estado natural hematita, tienen mayormente efectos sobre la pigmentación de las muestras. Por otra parte, el óxido de hierro también tiene efectos sobre el ferroaluminato tetracalcico, siendo un componente de este, que dentro de sus efectos esta aportar un porcentaje disminuido de resistencia, de igual manera sobre la pigmentación y en la temperatura de la clinkerización.

## Caracterización Microscópica

### Microscopia electrónica de barrido (SEM)

La Figura 32 muestra la microestructura obtenida para la muestra de lodo y un análisis composicional en la zona mediante SEM EDS.

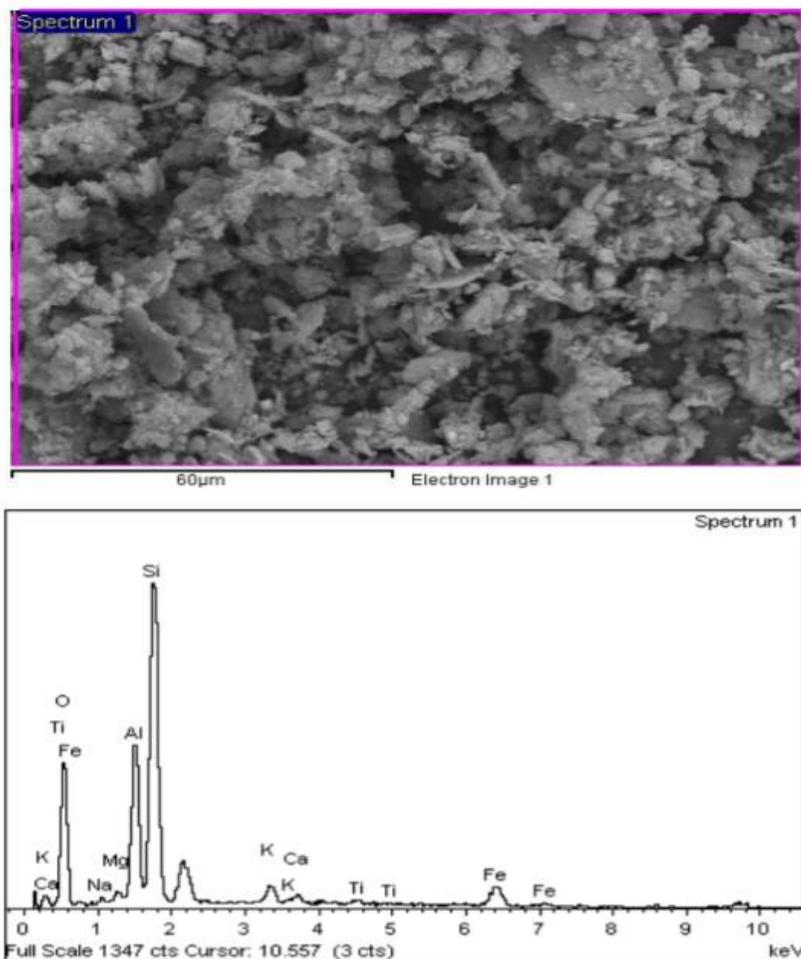


Figura 32. Composición y Microestructura de Lodo. Fuente: Porrás Karla, Vizcaino Armando.

El análisis de composición de la muestra de lodo presenta un alto valor porcentual de O (47.51%), Si (28.79%) y Al (11.96%). En la Figura 32 se observa una morfología dispersa y tamaño de partículas variadas, pese a esto se identifica la regularidad y frecuencia de los componentes alargados y planos.

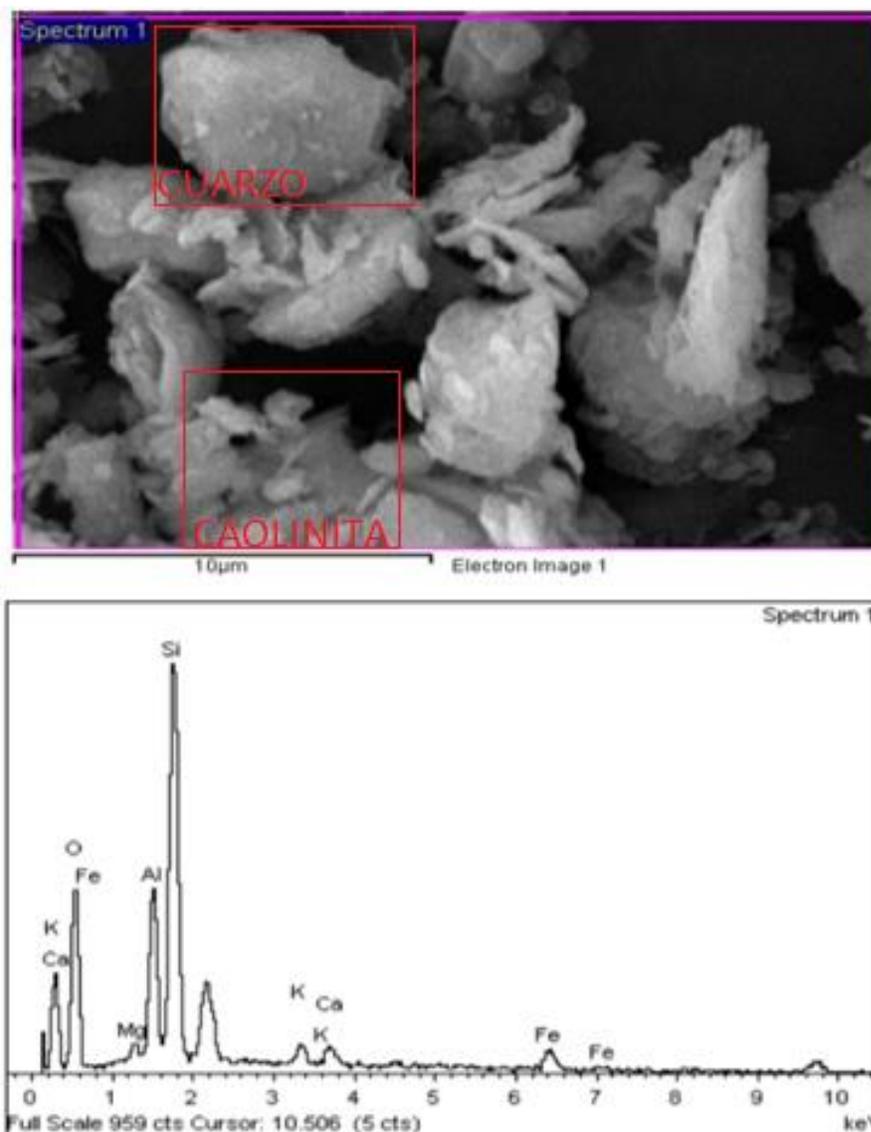


Figura 33. Compuestos presentes en la muestra de lodo. Fuente: Porras Karla, Vizcaino Armando

En la Figura 33 se observa formación granular conformada mayormente por O (48.54%), Al (11.05%) y Si (29.98%) en la cual se puede observar granos de Cuarzo con estructura cristalina definida, también se ilustra la morfología y distribución de tamaño de las partículas de Caolinita, siendo este de finas escamas o laminas típicamente monoclinicas lo que describe bien a este material arcilloso.

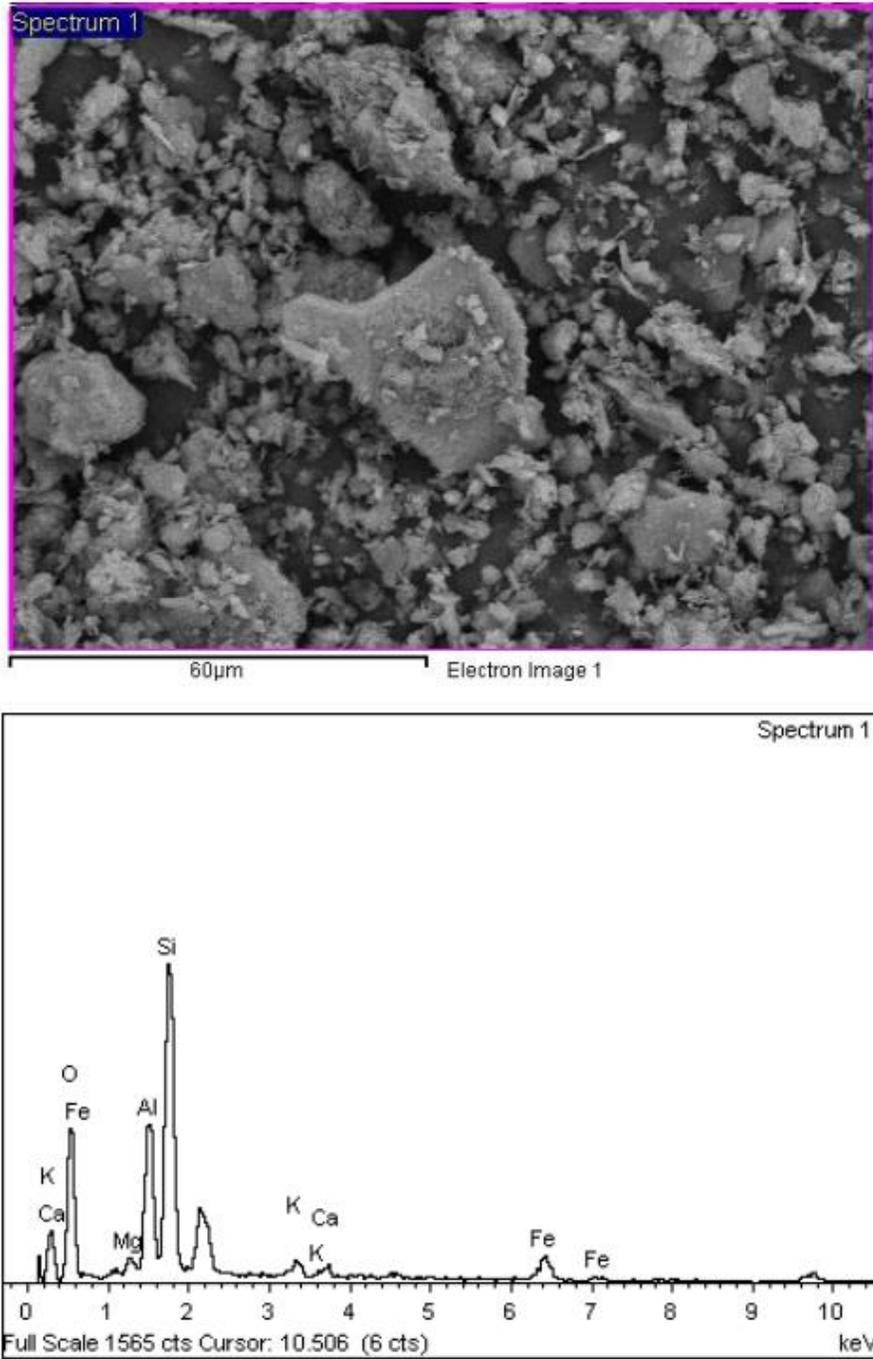


Figura 34. Compuestos y Microestructura de la Ceniza de Lodo. Nota: Fuente: Elaboración propia Porras Karla, Vizcaino Armando

En la Figura 34 se observa que la muestra del lodo calcinado a 800°C está compuesta por O (46.68%), Al (12.22%) y Si (28.94%), esta mantuvo la composición predominante y común del

lodo sin cenizar con un mínimo aumento en la cantidad porcentual de óxidos Mg (1.56%), K (1.83%) y Ca (1.30%), el aumento de estos se debe a la temperatura de calcinación.

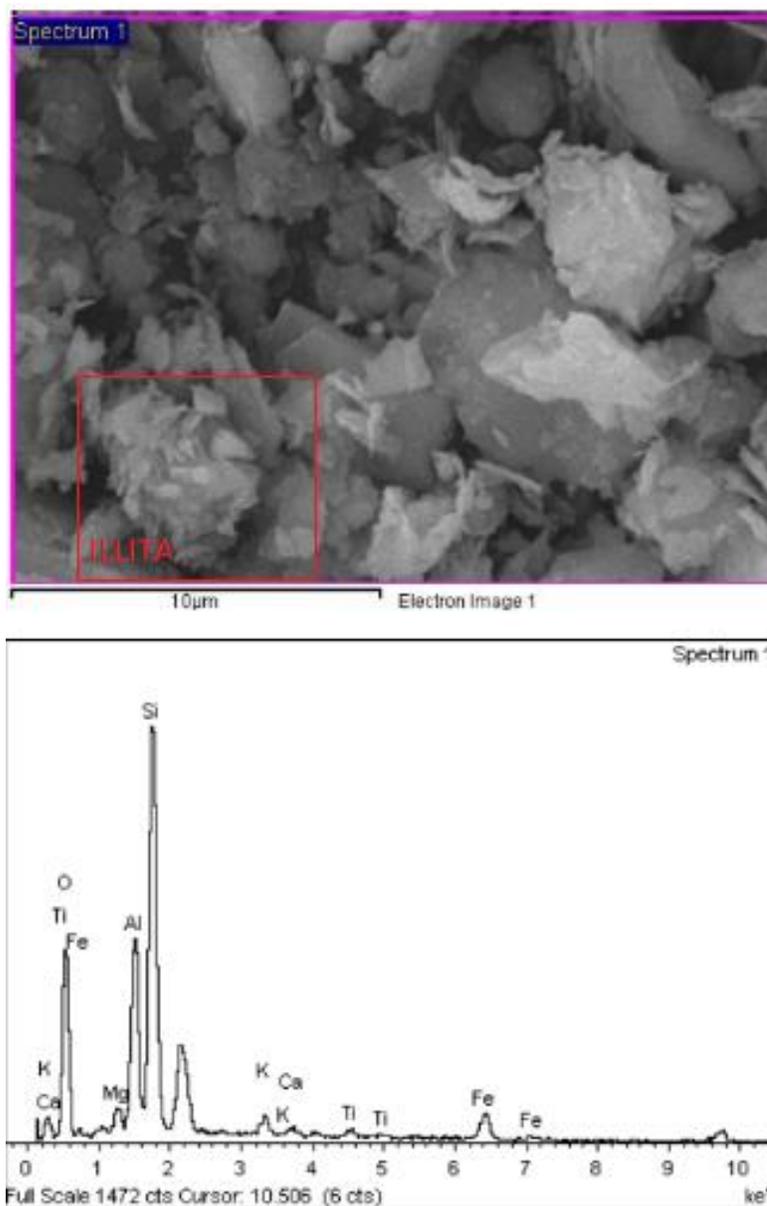


Figura 35. Compuestos Presentes en la Muestra; Ceniza de Lodo. Fuente: Porras Karla, Vizcaíno Armando

En la Figura 35 se observa que la composición elemental de la ceniza de lodo está conformada por O (47.69%), Al (11.88), Si (28.51%) y Fe (6.52%). Los niveles de SiO<sub>2</sub> no muestran diferencias significativas en comparación a al lodo sin cenizar evidenciando la

presencia de Cuarzo y el aspecto común de Illita 2M1, perteneciente al grupo de las Micas caracterizada por delgadas laminas flexibles y Cuarzo.

En la morfología de ambas muestras se evidencia una relación superficial, en ambos casos es evidente el tamaño de grano y la compactación entre ellos, además podemos notar láminas finas con considerable cristalinidad, ya que es posible ver claramente sus bordes definidos y de forma hexagonal localizadas principalmente en los poros, este tipo de placas se le atribuyen comúnmente a la Portlandita, compuesto importante en solución de Cemento Portland.

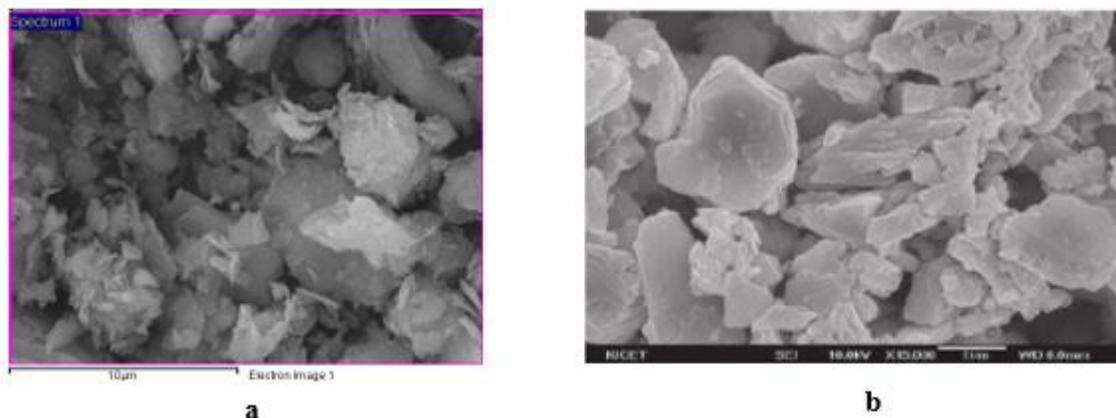


Figura 36. A) Microestructura de la muestra de Lodo. Fuente: Porras Karla, Vizcaíno Armando. B) Microestructura del cemento portland. Fuente: (Chakraborty & Wan Jo, 2014)

El posible uso de los lodos como material cementante suplementario es muy probable, ya que tiene una composición química porcentual considerablemente similar al cemento portland, ambos presentan una composición química arcillosa que tiene un alto contenido de silicatos y aluminatos representados secuencialmente como óxido de silicio o sílice ( $\text{SiO}_2$ ) y óxido de aluminio o alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), y en menor proporción óxido férrico ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) y otros compuestos. En base a esos compuestos básicos se generan una serie de reacciones químicas junto a un tratamiento térmico controlado de temperaturas elevadas, para así obtener los productos que

imparten al lodo y al cemento portland características similares en su acondicionamiento químico y propiedades mecánicas.

### Conclusiones

- En general las muestras no poseen grandes diferencias entre los resultados obtenidos de los ensayos. La muestra de ceniza de lodo tiene un color parduzco rojo que no se encuentra presente en la muestra de lodo. La densidad de la muestra de lodo es menor que la de ceniza de lodo, el porcentaje de finura en la muestra de lodo es mayor que la muestra de ceniza de lodo, la cual también presenta un diámetro inferior de  $570.860 \mu\text{m}$  en un 90% de volumen.
- El análisis de actividad puzolanica realizado evidencia un alto consumo de  $\text{Ca(OH)}_2$  mg/g de muestra, estableciendo así los valores obtenidos para la muestra calcinada a  $800^\circ$  superan los valores máximos establecidos y clasificando a esta según la literatura como muestra puzolanica.
- El análisis de DRX refleja que la muestra de lodo y ceniza de lodo están compuestos principalmente de Cuarzo e Ilita 2M1 respectivamente, el cuarzo presenta un aumento de 4.8 entre las dos muestras y la Ilita 2M1 no se encuentra presente en la muestra de lodo. El análisis de Fluorescencia de rayos X determino que los principales óxidos presentes en las dos muestras son;  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , en porcentajes el  $\text{SiO}_2$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  presentan disminuciones en su porcentaje, en cambio el  $\text{Al}_2\text{O}_3$  presenta aumento.
- El análisis de SEM refleja que la muestra de lodo presenta formaciones granulares conformadas principalmente por O, Al y Si, también se evidencian finas escamas o laminas monolíticas propias de un material arcilloso. En la muestra de ceniza de observo que esta principalmente compuesta por O, Al, Si y Fe. El nivel de  $\text{SiO}_2$  no presenta diferencias significativas entre las dos muestras, evidenciando presencia de cuarzo e Ilita 2M1, la cual pertenece al grupo de las micras conocidas por ser laminas flexibles y cuarzo.

Luego de realizar la discusión del presente trabajo de investigación, donde se compararon las propiedades fisicoquímicas de las muestras de lodo y ceniza de lodo calcinada a 800 °C, se puede responder la pregunta problema planteada; las muestras de lodo y ceniza de lodo poseen características como la densidad, los óxidos y la composición química similares al cemento portland I. Por lo tanto, estos lodos pueden ser usado como sustituyente parcial del cemento, esto teniendo en cuenta otras variables que se deben considerar dentro de los diseños de mezclas.

### Referencias

- (PDF) Síntesis de un nanocemento de material cementoso utilizando el concepto de nanotecnología ascendente: un enfoque alternativo para evitar la emisión de CO<sub>2</sub> durante la producción de cemento. (n.d.). Retrieved May 31, 2020, from [https://www.researchgate.net/publication/264546494\\_Synthesis\\_of\\_a\\_Cementitious\\_Material\\_Nanocement\\_Using\\_Bottom-Up\\_Nanotechnology\\_Concept\\_An\\_Alternative\\_Approach\\_to\\_Avoid\\_CO2\\_Emission\\_during\\_Production\\_of\\_Cement](https://www.researchgate.net/publication/264546494_Synthesis_of_a_Cementitious_Material_Nanocement_Using_Bottom-Up_Nanotechnology_Concept_An_Alternative_Approach_to_Avoid_CO2_Emission_during_Production_of_Cement)
- Ahmad, T. (2016). Characterization of Water Treatment Plant's Sludge and its Safe Disposal Options Reuse options of water treatment plant's sludge View project Anaerobic Digestion View project. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.07.088>
- Alqam, M., Jamrah, A., & Daghlis, H. (2011). Utilization of cement incorporated with water treatment sludge. *Jordan Journal of Civil Engineering*, 5(2), 268–277.
- Altoandinas, R. D. I. (2018). Vol 20 n° 2. 20(2), 225–234.
- Angelica, E., & Tuebjn, V. (1999). Estabilizado de un lodo ceramico en una estructura poucrístauna.
- Benlalla, A., Elmoussaouiti, M., Dahhou, M., & Assafi, M. (2015). Utilization of water treatment plant sludge in structural ceramics bricks. *Applied Clay Science*, 118, 171–177. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.09.012>
- Bohórquez González, K., Pacheco, E., Guzmán, A., Avila Pereira, Y., Cano Cuadro, H., & Valencia, J. A. F. (2020a). Use of sludge ash from drinking water treatment plant in

hydraulic mortars. *Materials Today Communications*, 23(October 2019), 100930.

<https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.100930>

Bohórquez González, K., Pacheco, E., Guzmán, A., Avila Pereira, Y., Cano Cuadro, H., & Valencia, J. A. F. (2020b). Use of sludge ash from drinking water treatment plant in hydraulic mortars. *Materials Today Communications*, 23, 100930.

<https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.100930>

Chen, H. X., Ma, X., & Dai, H. J. (2010). Reuse of water purification sludge as raw material in cement production. *Cement and Concrete Composites*, 32(6), 436–439.

<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.02.009>

Cong, X., Lu, S., Gao, Y., Yao, Y., Elchalakani, M., & Shi, X. (2020). Effects of microwave, thermomechanical and chemical treatments of sewage sludge ash on its early-age behavior as supplementary cementitious material. *Journal of Cleaner Production*, 258, 120647.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120647>

Cristalografía. Dispersión y difracción. (n.d.). Retrieved March 25, 2020, from

[https://www.xtal.iqfr.csic.es/Cristalografia/parte\\_05.html](https://www.xtal.iqfr.csic.es/Cristalografia/parte_05.html)

Duda, W. H. (1977). *Cement Data Book* (p. 539).

Figueiredo, M. O. (1986). A unified geometrical scheme for polytypism in phyllosilicates.

*Bulletin de Mineralogie*, 109(1–2), 31–44. <https://doi.org/10.3406/bulmi.1986.7914>

FLOREZ ARENAS, A. (2016). Caracterización De Arcillas Y Preparación De Pastas Cerámicas Para La Fabricación De Ladrillos En La Ladrillera Mariscal Robledo S.a. Facultad de Tecnologías: Química Industrial, Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia, C, 1–19.

FRANCISCO RAMÍREZ QUIRÓS. (n.d.). Retrieved March 12, 2019, from

<http://www.tecnicaindustrial.es/tiadmin/numeros/35/43/a43.pdf>

FRÍAS, M., LUXAN, M. P. D. E., & ROJAS, M. I. S. DE. (1988). Espectrometría de difracción por rayos laser Diffraction spectrometry by laser beams. 38, 16.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2011). NTC 221 Método de ensayo para determinar la densidad del cemento hidráulico. 1–8. <https://tienda.icontec.org/wp-content/uploads/pdfs/NTC221.pdf>

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación - INCONTEC. (2013). NTC 226 - MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR LA FINURA DEL CEMENTO HIDRÁULICO POR MEDIO DE LOS TAMICES DE 75  $\mu\text{m}$  (No. 200) Y DE 150  $\mu\text{m}$  (No. 100). 53(9), 1689–1699. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

La, E. N., De Materiales, C., Ipohorski, M., & Bozzano, P. B. (n.d.). MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO.

Li, Z., Jiang, N., Wu, F., & Zhou, Z. (2013). Experimental investigation of phosphorus adsorption capacity of the waterworks sludges from five cities in China. *Ecological Engineering*, 53, 165–172. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLENG.2012.12.038>

Lodo, C. D. E., Concreto, E. N., & Cemento, C. O. N. (2019). Comportamiento de mezcla de concreto cemento Portland con adiciones de 5 y 10 % de cenizas de lodos Comportamiento de mezcla de concreto cemento Portland con adiciones de 5 y 10 % de cenizas de lodos. 1–85.

Paper, C., & Ram, R. M. (2011). Valorización De Residuos Generados En Plantas

Potabilizadoras En El Proceso De Producción De Zeolitas De Intercambio Ionico Para Tratamiento De Agua. June.

Pereira, Y. A., Restrepo Velasquez, S., Valencia, J. J., Castillo Ramírez, M., & Parody Muñoz, A. (n.d.). (No Title).

Potabilización - Triple A S.A. E.S.P. | Empresa de Servicios Públicos. (n.d.). Retrieved March 25, 2020, from <https://www.aaa.com.co/potabilizacion/>

Quintero, H. R., & Roa, F. B. (2016). Evaluación fisicoquímica del método de calcinación como alternativa ambiental de reducción del volumen de lodos de aguas residuales de una industria de curtido de San Benito. Ingeniería Ambiental y Sanitaria. [https://ciencia.lasalle.edu.co/ing\\_ambiental\\_sanitaria/15](https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/15)

Renau-Piqueras, J., & Faura, M. (1994). Principios básicos del Microscopio Electrónico de Barrido 1.-Introducción.

Ruíz, A. A. B. (2015). No 主観的健康感を中心とした在宅高齢者における健康関連指標に関する共分散構造分析Title. 3(2), 54–67. <http://repositorio.unan.edu.ni/2986/1/5624.pdf>

Tantawy, M. A. (2015). Characterization and pozzolanic properties of calcined alum sludge. Materials Research Bulletin, 61, 415–421. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2014.10.042>

Universidad Nacional de Colombia., H. A., AGUDELO, H. A., HERNÁNDEZ, A. V., & CARDONA, D. A. R. (2012). Gestión y ambiente. In Gestión y Ambiente (Vol. 15, Issue 1). Universidad Nacional de Colombia. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/gestion/article/view/30825>

xrfs. (n.d.). Retrieved March 25, 2020, from

<https://www2.uned.es/cristamine/mineral/metodos/xrfs.htm>

(PDF) Síntesis de un nanocemento de material cementoso utilizando el concepto de

nanotecnología ascendente: un enfoque alternativo para evitar la emisión de CO<sub>2</sub> durante la

producción de cemento. (n.d.). Retrieved May 31, 2020, from