

**ANÁLISIS ESTADÍSTICO COMPARATIVO DEL CONTENIDO DE ÓXIDOS
PRESENTES EN LODOS SIN CALCINAR, LODOS CALCINADOS Y CEMENTO
PORTLAND**



**DORALIS PACHECO JIMÉNEZ
KELLY VANESSA VARELA GÓMEZ**

**UNIVERSIDAD DE LA COSTA – CUC
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL
BARRANQUILLA – ATLÁNTICO
2019**

**ANÁLISIS ESTADÍSTICO COMPARATIVO DEL CONTENIDO DE ÓXIDOS
PRESENTES EN LODOS SIN CALCINAR, LODOS CALCINADOS Y CEMENTO
PORTLAND**

**DORALIS PACHECO JIMÉNEZ
KELLY VANESSA VARELA GÓMEZ**

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

**Director
YOLEIMY DEL CARMEN AVILA PEREIRA, M. Sc.**

**Codirector
FABRICIO DE PAOLI, M. Sc.**

**UNIVERSIDAD DE LA COSTA – CUC
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE CIVIL Y AMBIENTAL
BARRANQUILLA – ATLÁNTICO
2019**

Nota de aceptación

Presidente de Jurado

Jurado

Jurado

Barranquilla, _____ 2019

Dedicatoria

Dedicado a Dios, por la sabiduría y fortaleza brindada para no desistir en cada uno de los proyectos emprendidos. A nuestros padres y familiares, motores principales para optar por este título.

Agradecimientos

Principalmente a Dios quien ilumina mi camino y me llena de persistencia para luchar cada día por mis sueños. A mis padres motor de mi vida y lucha diaria, a mis hermanos por su apoyo, a mis padrinos y familiares quienes siempre han confiado en mis capacidades, a mis amigos y compañeros de estudio por ser parte de este logro, a Doralis Gómez ya que sin su colaboración nada de esto hubiese sido posible. A la Ing Yoleimy Ávila y Fabricio de Paoli por acompañarnos y guiarnos en este proceso, al Ing Nemesio Daza por su apoyo, tiempo y conocimiento brindado.

Doralis Pacheco Jiménez

Esta tesis se la dedico primeramente a Dios, porque en esta meta que estoy por cumplir he tenido altibajos y me dio la fortaleza para continuar y no decaer en los obstáculos. A mis padres y hermana que son mi motor para seguir adelante, porque estuvieron apoyándome en todo momento para llegar a esta meta que también es de ellos y por enseñarme que el que quiere puede y que nada es imposible. A mis amigos por haberme ayudado hacer que este proceso fuera más factible. A la colaboración, conocimiento y acompañamiento brindado por los Ing. Yoleimi Ávila, Fabricio de Paoli y Nemesio Daza.

Kelly Vanessa Varela Gómez

Resumen

En el presente trabajo de investigación, se determinaron las concentraciones de óxidos presentes en el lodo proveniente de la planta de tratamiento de agua potable, ubicada en la ciudad de Barranquilla, Colombia; 2.0 kg de muestra fueron calcinados a 800 °C y la otra parte fue expuesta a temperatura ambiente durante tres días para su secado. Se obtuvieron datos de las concentraciones de óxidos presentes en los lodos calcinados y sin calcinar por medio de ensayo de fluorescencia de rayos X, los valores obtenidos fueron validados mediante la norma ASTM C114, con el fin de comparar las concentraciones de óxidos del cemento Portland tipo I. Estadísticamente se demostró que existe una diferencia significativa en las concentraciones de óxido de calcio, óxido de silicio, óxido de hierro y óxido de aluminio de las muestras de lodos y el cemento. Las muestras de lodos clasificaron como una puzolana de clase F con bajos contenidos de calcio según la norma ASTM C618. Los porcentajes de óxido de magnesio y azufre en los lodos no exceden las cantidades exigidas por la norma ASTM C150.

Palabras clave: Cenizas de lodo, material cementante suplementario, XRF

Abstract

In this research work, the quantities of oxides present in sludge coming from drinking water treatment plant in Barranquilla, Colombia was determined; part of specimen (2.0 kg) was calcined at 800 °C and the other portion was dried during three days with surrounding temperature. The concentration of oxide in sludge calcined and sludge not calcined was get by X-rays fluorescence, the results were validated by ASTM C114, to compare the results with oxides concentration in Portland cement type I. Statistically it was revealed there is a significant difference in calcium oxide, silicon dioxide, ferric oxides and aluminum oxide concentrations of the sludge and the Portland cement. The sludge coming from drinking water treatment plant have a high cementitious potential when classified as a class F pozzolan with low calcium oxide content, in accordance with ASTM C618. The percentages of magnesium oxide and sulfur trioxide in the sludge don't exceed the values required by the ASTM C150 standard.

Keywords: Sludge ash, supplementary cementitious material, XRF

Contenido

| | | |
|-------|--|----|
| | Lista de tablas y figuras..... | 9 |
| 1. | Introducción | 12 |
| 1.1 | Planteamiento del problema..... | 15 |
| 1.2 | Justificación..... | 17 |
| 1.3 | Objetivos | 18 |
| 1.3.1 | Objetivo General. | 18 |
| 1.3.2 | Objetivos específicos..... | 18 |
| 2. | Marco referencial | 18 |
| 2.1 | Marco legal..... | 18 |
| 2.1.1 | Normatividad Colombiana. | 18 |
| 2.2 | Marco teórico | 22 |
| 2.2.1 | Proceso para la potabilización del agua. | 22 |
| 2.2.2 | Emisiones de CO ₂ en la producción del cemento..... | 24 |
| 2.2.3 | Materiales cementantes suplementarios. | 26 |
| 2.2.4 | Ensayo de fluorescencia de rayos X (XRF). | 31 |
| 2.2.5 | Estadística inferencial. | 32 |
| 2.3 | Estado del arte | 33 |
| 3. | Parte Experimental | 36 |
| 3.1 | Obtención de la muestra..... | 36 |
| 3.2 | Preparación de muestra | 37 |
| 3.3 | Ensayo de Fluorescencia de rayos-X | 38 |
| 3.4 | Análisis del contenido de óxido de los lodos | 39 |
| 4. | Resultados y discusión | 40 |
| 4.1 | Resultados obtenidos..... | 40 |
| 4.2 | Aplicación estadística inferencial..... | 42 |
| 4.3 | Comparación del contenido de óxido de los lodos y el cemento. | 49 |
| 4.3.1 | Comparación de los resultados con otros trabajos. | 54 |
| 5. | Conclusión..... | 57 |
| 6. | Referencias | 58 |
| | Anexos | 67 |

Lista de tablas y figuras**Tablas.**

| | |
|--|----|
| Tabla 1 Composición química del cemento..... | 26 |
| Tabla 2 Mediana de los resultados obtenidos mediante XRF..... | 41 |
| Tabla 3 Desviación estándar de la mediana del contenido de óxidos de los lodos..... | 42 |
| Tabla 4 Pruebas de normalidad para LCC | 43 |
| Tabla 5 Pruebas de normalidad para LSC..... | 43 |
| Tabla 6 Resumen de contraste de hipótesis LCC para SiO ₂ | 44 |
| Tabla 7 Requisitos de la composición química del cemento ASTM C150 | 51 |
| Tabla 8 Variaciones máximas permitidas para los resultados de XRF..... | 52 |
| Tabla 9 Aplicación norma ASTM C114 para los óxidos del LCC..... | 53 |
| Tabla 10 Requerimientos químicos para las puzolanas | 53 |
| Tabla 11 Composición química del cemento..... | 54 |
| Tabla 12 Comparación del porcentaje de óxidos de LCC con otros estudios | 55 |
| Tabla 13 Comparación del porcentaje de óxidos para LSC con otros estudios..... | 56 |
| Tabla 14 Resultados XRF para lodo calcinado..... | 67 |
| Tabla 15 Resultados XRF para lodo sin calcinar..... | 68 |
| Tabla 16 Resumen de contraste de hipótesis LCC para Al ₂ O ₃ | 69 |
| Tabla 17 Resumen de contraste de hipótesis LCC para Fe ₂ O ₃ | 69 |
| Tabla 18 Resumen de contraste de hipótesis LCC para MgO | 69 |
| Tabla 19 Resumen de contraste de hipótesis LCC para CaO | 70 |
| Tabla 20 Resumen de contraste de hipótesis LCC para SO ₃ | 70 |
| Tabla 21 Resumen de contraste de hipótesis LSC para SiO ₂ | 70 |
| Tabla 22 Resumen de contraste de hipótesis LSC para Al ₂ O ₃ | 71 |
| Tabla 23 Resumen de contraste de hipótesis LSC para Fe ₂ O ₃ | 71 |
| Tabla 24 Resumen de contraste de hipótesis LSC para MgO..... | 71 |
| Tabla 25 Resumen de contraste de hipótesis LSC para CaO..... | 72 |
| Tabla 26 Resumen de contraste de hipótesis LSC para SO ₃ | 72 |

Figuras.

| | |
|--|----|
| Figura 1 Vista satelital de la PTAP Triple A, adaptado de Google Earth. | 37 |
| Figura 2 A: Aglomerante CEREOX, B: Balanza y crisol, C: Anillos de bronce y cilindro de compactación. | 38 |
| Figura 3 A: Selección de la muestra, B: Prensa XRF, C: Pastilla. | 39 |
| Figura 4 A: Pastillas de lodo en la máquina XRF, B: Máquina XRF. | 39 |
| Figura 5 Diagramas de caja y bigote para el SiO_2 (A) LCC, (B) LSC, (C) Comparación de los lodos, | 45 |
| Figura 6 Diagramas de caja y bigote para el Al_2O_3 (A) LCC, (B) LSC, (C) Comparación de los lodos, | 46 |
| Figura 7 Diagramas de caja y bigote para el Fe_2O_3 (A) LCC, (B) LSC, (C) Comparación de los lodos,..... | 46 |
| Figura 8 Diagramas de caja y bigote para el CaO (A) LCC, (B) LSC, (C) Comparación de los lodos,..... | 47 |
| Figura 9 Diagramas de caja y bigote para el MgO (A) LCC, (B) LSC, (C) Comparación de los lodos,..... | 47 |
| Figura 10 Diagramas de caja y bigote para el SO_3 (A) LCC, (B) LSC, (C) Comparación de los lodos,..... | 48 |
| Figura 11 Comparación de los datos obtenidos mediante XRF y el contenido de óxidos del cemento, | 49 |

Glosario de abreviaturas.

| | |
|------------------------------------|--|
| Al₂O₃ | Óxido de aluminio |
| CaO | Óxido de calcio |
| Ca(OH)₂ | Hidróxido de calcio |
| CO₂ | Dióxido de calcio |
| DQO | Demanda química de oxígeno |
| EAH | Escoria de alto horno |
| EIS | Espectroscopía de impedancia electroquímica |
| Fe₂O₃ | Óxido de hierro |
| HPC | Concreto de alto rendimiento |
| LCC | Lodo calcinado |
| LPTAP | Lodo de plantas de tratamiento de agua potable |
| LSC | Lodo sin calcinar |
| MgO | Óxido de magnesio |
| OPC | Cemento portland ordinario |
| PTAP | Plantas de tratamiento de agua potable |
| PTAR | Plantas de tratamiento de agua residual |
| SCM | Material cementante suplementario |
| SF | Humo de sílice |
| SiO₂ | Óxido de silicio |
| SO₃ | Óxido de azufre |
| SSA | Ceniza de lodo residual |
| XRF | Fluorescencia de rayos - X |

1. Introducción

El constante crecimiento poblacional de las últimas décadas ha conllevado a una mayor demanda en los productos de consumo e industriales. Los desechos agroindustriales, orgánicos y combustibles, son algunos de los factores que mayor participación contaminante han tenido (Gastaldini et al., 2015).

La industria encargada de producir materiales cementantes ha tratado de mitigar los efectos consecuentes de la contaminación ambiental, generada por la fabricación de cemento, reduciendo las emisiones de gases producidas. Las plantas modernas liberan aproximadamente 0.7 toneladas métricas de CO₂ por cada tonelada métrica de Clinker producido (Gastaldini et al., 2015). Se han realizado estudios para desarrollar hormigón ecológico con bajas emisiones de CO₂, el cual implementa como alternativa de reemplazo del cemento, la ceniza de carbón y el silicato dicálcico (Higuchi, Morioka, Yoshioka, & Yokozeki, 2014).

En la última década, la creciente preocupación por la contaminación ambiental ha llevado a que varios países como China, Brasil, USA, entre otros, realicen diversas investigaciones para determinar cuál sería el uso de los materiales mayormente, producidos a nivel mundial, provenientes de los residuos domésticos, residenciales, institucionales, entre otros. Los estudios se basan en obtener las principales características, propiedades y finalmente aplicaciones de estos subproductos en el campo de la construcción. (Hagemann, Gastaldini, Cocco, Jahn, & Terra, 2019; Paris, Roessler, Ferraro, DeFord, & Townsend, 2016; Yue, Wang, & Bai, 2018). Los lodos de PTAP contienen una gran cantidad de óxidos, principalmente constituyentes de las arcillas, con elevadas cantidades de sílice, aluminio y hierro (Hagemann et al., 2019), propiedades químicas de alto provecho para la industria cementera en construcciones verdes.

Varios investigadores han estudiado diferentes materiales de origen residual siendo incorporados en la elaboración de mortero y/o concreto como reemplazo parcial de los materiales cementantes. Estos materiales alternativos son conocidos como materiales cementantes suplementarios (SCM). Los SCM (ej. las cenizas de cáscara de arroz, caña de azúcar, SF, EAH, residuos de vidrio) buscan disminuir el porcentaje de energía incorporada y el impacto ambiental que ocasionan al ser nuevamente depositados en el medio ambiente. Dentro de sus posibles usos se puede encontrar su implementación como rellenos de construcción, agregados de concreto y pavimento (Paris et al., 2016). Usualmente, el porcentaje de adición de los SCM depende de sus propiedades físico-químicas y de las características del entorno en el cual se encuentra expuesto (Higuchi et al., 2014).

Por su parte el crecimiento poblacional, a nivel global, ha sido de carácter exponencial, aumentando directamente el consumo de recursos hídricos o agua potable. El proceso de potabilización del agua cruda realizado en PTAP, genera grandes cantidades de lodos residuales. La composición y cantidad producida de lodos de PTAP depende de los minerales y sólidos encontrados en el agua captada y los diversos procesos (implementación de químicos o aglomerantes) que utilizan para su posterior consumo. Una vez finalizado el ciclo de potabilización del agua, se obtienen como residuo los lodos de PTAP, los cuales posteriormente se desechan sin darle un uso que ayude a disminuir la huella medioambiental que provocan (Ahmad, Ahmad, & Alam, 2016).

La descarga de los lodos de tratamiento de agua en ríos, arroyos, lagunas, lagos, desagües, etc. o el depósito en vertederos de los lodos deshidratados, no es una opción de eliminación favorable al medio ambiente. Al tener en cuenta las características presentes en los LPTAP, se ha revisado una metodología para la disposición sostenible y rentable mediante el reciclaje y la reutilización

de estas. La utilización de LPTAP en la fabricación de ladrillos, cerámica, cemento, materiales cementosos y como un sustituto de los materiales de construcción, podría proporcionar una ruta de eliminación segura (Ahmad et al., 2016).

Los antecedentes demuestran la viabilidad de utilizar lodos sin un proceso de tratado como sustitución parcial por agregados finos, cemento o material silíceo, también se han empleado como agregado grueso ligero (Gastaldini et al., 2015). El uso de la arcilla calcinada y piedra caliza junto con un material de composición similar como la ceniza de lodo de PTAP, han logrado mejorar la resistencia a la compresión de los cilindro de mortero (Hagemann et al., 2019).

La presencia de sílice, aluminio y hierro en los lodos resultantes del proceso de PTAP son algunos de los principales constituyentes de las arcillas calcinadas. Esta similitud hace que el fango de las PTAP sea un material prometedor para ser utilizado como una adición de minerales, cuando este elemento recibe un tratamiento similar al de las arcillas calcinadas. Además, el lodo de PTAP como adición de mineral es una alternativa interesante desde un punto de vista sostenible porque reduce la cantidad de residuos destinados a los vertederos (Hagemann et al., 2019).

Otros estudios realizados arrojan mejoras en la resistencia a la compresión de los morteros, con adición de LPTAP. Por ejemplo en los lodos calcinados a 700 °C, con un tiempo de residencia de 1 h y el tiempo de molienda de 1 h (Hagemann et al., 2019), con porcentajes de reemplazos de otros materiales como cal y yeso (Ceron, Millan, Espejel, Rodriguez, & Ramirez, 2013). Por tanto, la combinación de caliza y lodo de PTAP como SCM puede mejorar el desempeño de morteros y concretos. De igual manera puede contribuir con nuevas alternativas

para los sitios de eliminación de estos residuos, que son vertidos a la misma fuente de captación del agua cruda (Ahmad et al., 2016).

Al realizar la calcinación de muestras a temperaturas de 600 °C y 700 °C se ha demostrado que se obtienen mejores resultados de la concentración de Ca(OH)_2 con el aumento de temperatura. Realizar la calcinación a 800 °C ayudará a determinar qué tan factible es el desgaste de esta energía, con respecto al aumento que se puede generar en el Ca(OH)_2 . Cabe resaltar que se emplea un mayor consumo energético para esta temperatura. (Gastaldini et al., 2015)

El presente trabajo tiene como objetivo realizar un análisis comparativo de las concentraciones de los óxidos presentes en los lodos PTAP, ubicadas en la ciudad de Barranquilla y el OPC, teniendo como base la norma ASTM C150, y así determinar qué tan factible es su uso en el ámbito de la construcción. Se busca contribuir con la disminución de las emisiones de CO_2 generadas en el proceso de obtención del OPC y el problema del desecho de los LPTAP en la ciudad.

1.1 Planteamiento del problema

En Colombia la industria cementera está controlada por un oligopolio conformado principalmente por las empresas Grupo Argos, CEMEX Colombia S.A. y Holcim Colombia S.A. (Latorre, 2018). Para febrero del 2019, los despachos de cemento gris en Colombia totalizaron 985.0 mil toneladas y presentaron un aumento del 3.1% con relación al mismo mes del 2018 (DANE, 2018).

La industria del cemento es responsable de cerca del 5.0 % del total de las emisiones de CO_2 generadas por el hombre. Por esta razón, la protección del clima siempre ha sido una de las principales prioridades de la Iniciativa para la Sostenibilidad del Cemento (CSI). La producción

de cemento genera otras emisiones además de CO₂, incluyendo partículas sólidas, óxido de nitrógeno (NO_x), óxido de azufre (SO_x) y otros micro-contaminantes (FICEM, 2013).

El desmesurado desarrollo urbanístico, conlleva a que cada día se aumenten las actividades industriales, agrícolas, domésticas y de servicios públicos, originando a su vez mayores cantidades de residuos sólidos orgánicos urbanos. Estos residuos constituyen cerca del 70.0 % del volumen total de desechos generados (Vargas, Buzón, Vergara, & Molina, 2011). A su vez pueden ser una alternativa real para el desarrollo sostenible en la industria de la construcción civil, dando como beneficio ambiental la reducción de materiales contaminantes y el menor empleo de recursos naturales (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2005).

Desde hace más de 30 años en un número plural de países se utiliza el co-procesamiento en hornos cementeros como la mejor solución ecoeficiente para la disposición final de residuos y desechos. La cifra actual es de 20 millones de toneladas anuales. En América Latina, la utilización de combustibles alternativos, residuos, desechos y biomasa ha tomado una fuerza significativa con sustitución en rangos que van desde el 7.0 % hasta el 20.0 % (FICEM, 2013)

En Colombia cada vez está produciendo una mayor cantidad de residuos en las PTAP, generando así una mayor necesidad de planes para la adecuada manipulación y eliminación de estos residuos. En el país existen normas para el manejo y disposición de los LPTAP, además de leyes que proponen parámetros para la disposición de estos. Sin embargo, hasta ahora no se presentan resultados concretos, ya que estas pautas no son cumplidas, por lo los residuos son arrojados nuevamente a las cuencas (Ramirez, 2003).

En los últimos años se han venido desarrollando estudios e investigaciones sobre la aplicación de residuos agroindustriales en forma de adiciones minerales. El uso de las cenizas de caña de azúcar, cenizas de cáscara de arroz, ceniza de lodo de papel y el uso de la ceniza de caucho

reciclado, contribuyen a la disminución de la erosión y de las emisiones de carbono (Molina, Tarifa, & Mendoza, 2015). Con la incorporación de los LPTAP en la producción de cemento, se espera obtener una alta reactividad en la industria cementera y un impacto medio ambiental positivo.

En este contexto, se estudia entonces la composición química de los LPTAP, y su uso como parte del material cementante, ya que son un residuo sólido que ha tenido como disposición final el vertimiento en el río Magdalena sin ningún tratamiento previo (Rojas, Garcia, Vargas, & Velilla, 2010). También se propone una nueva utilización del residuo, al mejorar las características químicas de la materia prima en las obras de construcción e implementando a su vez productos sostenibles y amigables con el medio ambiente.

1.2 Justificación

Debido a la gran cantidad de lodos generados a partir del proceso de potabilización del agua, se presenta la necesidad de darle un manejo más eficiente a la incineración, espesamiento o deshidratación de los desechos. Por lo que se busca implementar el uso de LPTAP en el sector de la construcción, involucrándolo de forma parcial en la producción de cemento y compensando las emisiones generadas al medio ambiente.

Investigar la composición química de los LPTAP es el primer paso para contemplar el material como SCM y posteriormente encontrar nuevas tecnologías, prácticas y procesos en la industria cementera y los sectores relacionados. De este modo se busca evitar o disminuir la contaminación por emisiones de monóxido de carbono, monóxido de nitrógeno, dióxido de azufre y partículas contaminantes muy finas generadas a partir del proceso convencional de obtención del Clinker. Estas emisiones afectan a la atmosfera provocando la irritación de los

tejidos del aparato respiratorio en las personas y agravando los síntomas para quienes presentan enfermedades pulmonares(Cavada, 2017).

Por lo anterior se presenta un nuevo tratamiento a la importante suma de lodos provenientes de plantas depuradoras, obteniendo nuevos productos cementeros sostenibles. Se busca también disminuir la producción de CO₂, al generar y procesar un LPTAP que servirá como SCM.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General.

Realizar un análisis comparativo del contenido de óxidos presentes en LCC, LSC y OPC mediante XRF.

1.3.2 Objetivos específicos.

- Analizar mediante XRF las concentraciones de óxidos presentes en las muestras de LCC y LSC.
- Validar los resultados de XRF mediante la prueba de normalidad y Kruskal -Wallis a través del software SPSS.
- Comparar las cantidades de óxidos presentes los LCC, LSC y OPC.

2. Marco referencial

2.1 Marco legal

2.1.1 Normatividad Colombiana.

La normativa colombiana establece varios decretos en cuanto al significado, tratamientos, vertimientos y disposición final de lodos proveniente de PTAP por lo cual se debe tener en cuenta lo que se establece con el fin de no omitir de la normativa colombiana, dicho lo anterior se presentan los siguientes decretos, artículos y leyes.

Se establece en el Artículo 12 del decreto 1594 del 1984 que es denominado “lodo a la suspensión de un sólido en un líquido proveniente de tratamiento de aguas, residuos líquidos u otros similares” (Decreto 1594, 1984).

En cuanto a los vertimientos de residuos líquidos el Artículo 60 del decreto 1594 de 1984 dice que “Se prohíbe todo vertimiento de residuos líquidos a las calles, calzadas y canales y sistemas de alcantarillado para aguas lluvias, cuando quiera que existan en forma separada o tengan esta única destinación” (Decreto 1594, 1984).

Sin embargo, el Artículo 63 del decreto 1594 de 1984, establece una salvedad de los vertimientos de residuos líquidos en acuíferos, la cual dice que “Se permite la infiltración de residuos líquidos siempre y cuando no se afecte la calidad del agua del acuífero en condiciones tales que impidan los usos actuales potenciales” (Decreto 1594, 1984).

Con respecto a la disposición final de los lodos el Artículo 70 del decreto 1594 de 1984. Establece que, debe ser tratado como un residuo sólido, teniendo en cuenta que:

Los sedimentos, lodos y sustancias sólidas provenientes de sistema de tratamiento de agua o equipos de control de contaminación ambiental, y otras tales como cenizas, cachaza y bagazo, no podrán disponerse en cuerpos de aguas superficiales, subterráneas, marinas, estuarinas o sistemas de alcantarillado, y para su disposición deberá cumplirse con las normas legales en materia de residuos sólidos (Decreto 1594, 1984).

Por ende, se tiene en cuenta que en el artículo 34 del decreto 2811 de 1974 establece que para el manejo de los residuos sólidos “se utilizarán los mejores métodos, de acuerdo con los avances de la ciencia y tecnología, para la recolección, tratamiento, procesamiento o disposición final de

residuos sólidos, basuras, desperdicios y, en general, de desechos de cualquier clase” (Decreto 2811, 1974).

No obstante, existen casos en los cuales las aguas se pueden utilizar como un sitio de disposición final para los residuos sólidos, debido a que el Artículo 9° de la ley 9 de 1979, dice que “No podrán utilizarse las aguas como sitio de disposición final de residuos sólidos, salvo los casos que autorice el Ministerio de Salud” (Ley 9, 1979).

Con respecto al procedimiento para la localización de los residuos sólidos el Artículo 4° del decreto 838 de 2005 establece que:

La incorporación de las áreas potenciales para la disposición final de residuos sólidos, mediante la tecnología de relleno sanitario, en los Planes de Ordenamiento Territorial, Planes Básicos de Ordenamiento Territorial y Esquemas de Ordenamiento Territorial, según sea el caso, se hará durante el proceso de adopción, o en el proceso de revisión, modificación y ajustes de los mismos, y debe realizarse de acuerdo con las disposiciones establecidas en la normatividad y en el Decreto 4002 del 30 de noviembre 2004 o las normas que lo adicionen, modifiquen o sustituyan (Decreto 838, 2005).

Sin embargo, existen prohibiciones y restricciones en la localización de áreas para disposición final de residuos sólidos, que en el Artículo 6° del decreto 838 del 2005. se dicen que son:

Fuentes subterráneas: En zonas de recarga de acuíferos.

Hábitats naturales críticos: Zonas donde habiten especies endémicas en peligro de extinción.

Áreas con fallas geológicas: A una distancia menor a sesenta (60) metros de zonas de la falla geológica.

Áreas pertenecientes al Sistema de Parques Nacionales Naturales y demás áreas de manejo especial y de ecosistemas especiales: tales como humedales, páramos y manglares.

Áreas inestables: Se deberá procurar que las áreas para disposición final de residuos sólidos, no se ubiquen en zonas que puedan generar asentamientos que desestabilicen la integridad de la infraestructura allí instalada, como estratos de suelos altamente compresibles, sitios susceptibles de deslizamientos y aquellos donde se pueda generar fenómenos de carsismo.

Zonas de riesgo sísmico alto: En la localización de áreas para disposición final de residuos sólidos, se deberá tener en cuenta el nivel de amenaza sísmica del sitio donde se ubicará el relleno sanitario, así como la vulnerabilidad de este (Decreto 838, 2005).

Sin embargo, no se debe pasar por alto que, al entenderse por residuo sólido con características especiales al patógeno, al tóxico, al combustible, al inflamable, al explosivo, al radiactivo y al volatilizable, teniendo en cuenta objetos o elementos que por su tamaño, volumen o peso requieran un manejo especial según el Artículo 97 del decreto N° 2104 del 26 de julio de 1983 estable que “Todo sistema de manejo de residuo sólido con características especiales deberá ser sometido a la aprobación por parte del Ministerio de Salud o su entidad delegada” (Decreto 2104, 1983).

Sin descartar que el Artículo 100 del decreto 2104 dice “De otros residuos sólidos que se consideran con características especiales. Toda mezcla de basuras que incluya residuos sólidos patógenos se considerará como residuo sólido con características especiales” (Decreto 2104, 1983).

2.2 Marco teórico

2.2.1 Proceso para la potabilización del agua.

- **Captación:** El Acueducto de Barranquilla toma el agua cruda del Río Magdalena a través de una bocatoma que la lleva a una laguna o dársena. De allí, el líquido pasa a dos estaciones de bombeo ubicadas, una en la dársena (la No. 2) y la otra (la No. 1), al final de un conducto de agua, llamado Canal de Aducción. Desde su paso por la dársena, se inicia el proceso de clarificación del agua. De estas dos estaciones de bombeo el agua es impulsada a las PTAP a través de tuberías de conducción de gran diámetro. (Triple A S.A. E.S.P, s. f.)
- **Coagulación – Floculación:** consiste en la adición de productos químicos coagulantes, que causan desestabilización de las partículas coloidales. Se producen partículas llamadas flóculos, reacción que se da en fracciones de segundos y con una fuerte agitación. Posteriormente, es adicionado en lenta agitación, otro producto químico, un polímero, que actúa como floculante, el cual produce la agregación de los flóculos formando partículas de mayor peso y tamaño (macro flóculos). (Triple A S.A. E.S.P, s. f.)
- **Sedimentación:** El agua floculada pasa a las unidades de decantación o clarificación donde ocurre la separación de los sólidos más densos. Estas unidades son estructuras físicas que se clasifican en decantadores de flujo horizontal, de flujo ascendente, de manto de lodos y de recirculación de lodos. En este punto del tratamiento del agua, se ha eliminado cerca del 75% de las impurezas biológicas e inorgánicas. (Triple A S.A. E.S.P, s. f.)

- Filtración: Posterior al proceso de clarificación se lleva a cabo la filtración del agua para eliminar todas aquellas partículas que no pudieron ser removidas en la decantación. Para la filtración del agua se emplean filtros de arena con lechos de grava.(Triple A S.A. E.S.P, s. f.)
- Desinfección: El agua completamente transparente debe ser sometida al proceso de desinfección a fin de eliminar los microorganismos patógenos causantes de enfermedades, principalmente de tipo intestinal. La desinfección se realiza adicionando cloro gas al agua en la salida de las plantas, antes de llegar a los tanques de almacenamiento.(Triple A S.A. E.S.P, s. f.)

2.2.1.1 Lodos generados de la potabilización del agua (LPTAP).

Los lodos se presentan como el resultado de los procesos de potabilización de agua, en las etapas de sedimentación y filtración; por lo general representan un 1.5 - 2.0 % del volumen total del agua generada en las PTAP (Gutiérrez-Rosero, Ramírez-Fajardo, Rivas, Linares, & Paredes, 2014). En la fase de sedimentación y filtración, un residuo compuesto básicamente con las características del agua bruta, más los hidróxidos de aluminio o hierro y carbonatos, son conocidos como LPTAP (Andrade et al., 2016).

La sílice, la alúmina, el óxido férrico y la cal constituyen el mayor porcentaje de componentes químicos presentes en el LPTAP (Ahmad et al., 2016). Las propiedades de los lodos generados en las PTAP pueden variar anual, estacional o diariamente, incluso en un mismo sistema de tratamiento, debido principalmente a la calidad u origen del agua afluyente y a los regímenes de coagulación determinados en tal sistema. Los lodos, aunque son considerados inertes, han sido tratados como residuo especial ya que retienen las sustancias presentes en el agua sin tratar, tales

como partículas en suspensión, arenas, arcillas, coloides, materia orgánica y microorganismos (Gutiérrez-Rosero et al., 2014).

Factores como la construcción y ampliación de las PTAP inciden directamente en la producción mundial de LPTAP, para el año 1997, se estimaba que superaba las 10 mil t/día (Gutiérrez-Rosero et al., 2014). La implementación PTAP's es limitada debido a sus altos costos de construcción, mantenimiento y operación, por ello el manejo y disposición final de estos lodos resulta ser un desafío. Debido a los grandes volúmenes de LPTAP con altos costos en el tratamiento, se genera la necesidad de que se instalen los equipos y técnicas necesarios para su empleo en otros procesos, que permitan darle un uso adecuado y posteriormente disminuir la cantidad de desechos (SEINTBA S.C, 2010).

El tamaño de grano de la ceniza de lodo de PTAP puede variar de 1 a 100 μm , con un tamaño promedio de aproximadamente 26 μm , y en algunos tipos de ceniza (incluso hasta el 90%) puede ser inferior a 75 μm . La morfología es irregular y porosa. Según algunos autores, la densidad de cenizas varía (pero no en gran medida) de 2.3 a 3,2 g / cm³, 2,62 g / cm³, y 2,86 g / cm³. (Vouk, Serdar, Nakić, & Anić-Vučinić, 2016)

2.2.2 Emisiones de CO₂ en la producción del cemento.

En el 2012 la producción mundial del cemento fue de 3859 Mt/año, lo que equivale a un consumo per cápita de 548 kg/año. Se espera que para el 2050 su producción se multiplique por un factor de 2.5, hasta cifras cercanas a 9,650 Mt/año. Esto equivale a un consumo per capita de 1005 kg/año, adicionalmente, su producción convencional genera un alto consumo energético e importantes emisiones de CO₂ (Restrepo, Restrepo, & Tóbon, 2014).

Las emisiones derivan del proceso convencional de síntesis, las cuales, dependiendo del tipo de planta, corresponden a cifras entre 0.62 y 0.97 toneladas de CO₂ por cada tonelada de

cemento que se produce. Este CO_2 es generado por la obtención y procesamiento de materias primas, la descarbonatación del CaCO_3 en la síntesis, la quema del combustible y la molienda final del Clinker al convertirlo finalmente en cemento (Restrepo et al., 2014).

En Colombia y en el mundo es muy común la práctica de adicionar caliza de alta pureza ($> 90.0\%$ de CaCO_3) al OPC para que cumpla el papel de un relleno (filler). Como consecuencia, se da el detrimento de la vida útil de las minas porque favorece el agotamiento de las reservas del material más puro que suele ser el más escaso en cualquier yacimiento. Es de vital importancia revisar el comportamiento del cemento, si en lugar de adicionar “caliza alta” se adiciona “caliza rebajada”, es decir, una caliza con un porcentaje importante de contaminantes ($>10.0\%$) (Tobón & Gómez, 2008).

En cuanto a la industria del cemento y la construcción, con una mayor atención a las emisiones de dióxido de carbono (CO_2), han estado explorando cada oportunidad para reducir la energía incorporada y la huella de carbono. El concreto actualmente incorpora varios subproductos industriales reciclados, como cenizas volantes y escoria de alto horno, ayudando a reducir la cantidad de materiales depositados en vertederos al tiempo que reduce el CO_2 (Nowasell & Kevern, 2015).

2.2.2.1 Composición química del cemento.

Se puede considerar que el cemento Portland consta de cuatro compuestos químicos primarios (o fases), como se indica en la Tabla 1, conformados principalmente por CaO , SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3 .

Tabla 1
Composición química del cemento.

| Nombre | Mineral | Fórmula | Composición |
|--------------------------------|---------|-------------------|---|
| Silicato tricálcico | Alita | C ₃ S | 3CaO.SiO ₂ |
| Silicato dicálcico | Belita | C ₂ S | 2CaO.SiO ₂ |
| Aluminato tricálcico | Celita | C ₃ A | 3CaO.Al ₂ O ₃ |
| Ferro - aluminato tetracálcico | Felita | C ₄ AF | 4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃ |

Nota: Compuestos químicos formados en el cemento, adaptado de (ACI Committee E-701, 2013)

En una reacción de hidratación del OPC, con dos óxidos (C₃S y C₂S) reaccionan con H para formar el silicato de calcio hidratado (C-S-H). Estos geles son los aglutinantes en morteros y hormigones. Además de C-S-H un producto de la hidratación de estos óxidos es el Ca(OH)₂; este puede reaccionar adicionalmente con sílice para formar más C-S-H. Esta reacción secundaria se denomina “reacción puzolánica” (Paris et al., 2016)

2.2.3 Materiales cementantes suplementarios.

los SCM son materiales agregados a una mezcla de concreto como un reemplazo parcial para el cemento portland. Los SCM son materiales cementantes alternativos, cementos mezclados, y sistemas cementosos no basados en cemento portland. (ACI Committee E-701, 2013)

SCM generalmente se clasifican en una de dos categorías: los auto cementantes y los puzolánicos. Los materiales auto cementantes reaccionan de manera similar al OPC; por lo que, la mezcla resultante se endurece durante una reacción hidráulica irreversible cuando se combina con agua (Paris et al., 2016). Una puzolana es un material, principalmente de composición silícea, que por sí sola no tiene propiedades de cemento en presencia de agua. Cuando una

puzolana se expone al agua y al calcio (generalmente en forma de cal) se hidrata y exhibe propiedades cementantes. (American Society for Testing and Materials, 2018)

2.2.3.1 Ceniza Volante.

La NTC 3493-17 define la ceniza volante como un residuo finamente dividido que resulta del proceso de combustión de carbón granulado o pulverizado y que es transportado por los gases de combustión. También es conocida como un subproducto de la generación de energía eléctrica mediante el uso de carbón mineral en centrales termoeléctricas, el cual, para el caso colombiano, fue almacenado como residuo durante varias décadas. Actualmente, la academia y la industria nacional han realizado estudios en la caracterización, manejo y uso de la ceniza volante, siendo empleado como material para relleno y finalmente se han evidenciado sus bondades como adición en el proceso de fabricación de cemento y concreto. (Fonseca, 2016).

Debido a su buen desempeño y respeto al medio ambiente, los materiales de construcción a base de cenizas volantes tienen un gran potencial como alternativa al OPC, lo que puede reducir la demanda de OPC y desviar las cenizas volantes del flujo de residuos. Esto también respalda la producción más limpia al reducir las emisiones, los contaminantes del aire y los desechos sólidos. (Gang & Xianming, 2018)

Las propiedades químicas de las cenizas volantes están relacionadas al tipo de carbón del cual proceden, así algunas son de naturaleza puzolánica y otras requieren de un agente aglutinante como el OPC, cal viva o hidratada y agua para poder reaccionar y producir compuestos cementosos (Wons et al., 2018)

Mediante EIS se encuentra que este nuevo material muestra una alta resistencia eléctrica y ha demostrado ser un agente de protección contra la corrosión en el hormigón armado, es decir,

presenta propiedades anticorrosivas superiores a las mostradas por la mezcla de hormigón convencional (Montaño, González, Castro, Gualdron, & Atencio, 2017).

2.2.3.2 Escoria de alto horno.

Las EAH son materiales muy utilizados como adición activa para la elaboración de distintos cementos comerciales. Estos cementos siderúrgicos tienen algunas propiedades y características sensiblemente mejores que los OPC, tales como menor calor de hidratación, alta resistencia a los sulfatos y al agua de mar (Puertas, 1993), por lo que los cementos de EAH granulados se recomiendan en ambientes agresivos, como el medio ambiente marino en las zonas costeras. Los materiales a base de cemento hechos de escoria granulada de alto horno tienen una débil resistencia a la carbonatación, especialmente cuando se aplican períodos cortos de curado (Sanjuan, Estevez, Argiz, & del Barrio, 2018).

Al realizar una investigación con dos tipos de concretos, uno con sustitución del 30.0, 50.0 y 70.0 % de EAH y otros con 100 % del material, se obtuvo que éstos últimos alcanzaron resistencias mayores y a velocidades mayores que los concretos 100 % de OPC, al ser mezclados con 8.0 % de Na_2O , seguido de los activados con 6.0 y 4.0 % de Na_2O (Espinoza & Escalante, 2008).

EAH puede ser usada como adición al cemento para producir concretos con características de resistencia a la compresión y a la penetración de cloruros similares o superiores a las obtenidas con sólo OPC. Sin embargo, es necesario evaluar qué porcentaje de adición produce un óptimo de resistencia según sea el caso. La adición de EAH aumenta notablemente la resistencia del concreto a la penetración de cloruros; los coeficientes de difusión medidos experimentalmente disminuyeron por encima de ocho veces cuando las mezclas fueron adicionadas (Lizarazo Marriaga & Claisse, 2011).

2.2.3.3 Humo de sílice.

El SF, también llamado como microsílíce o sílice activa, es un producto inorgánico constituido por partículas esféricas de gran finura que se originan en la reducción del cuarzo con carbón, durante los procesos de obtención de silicio metal y ferrosilicio en hornos eléctricos de arco (Sollutia.com, s. f.-b). El SF es un material esencial para formular HPC. Su pequeño tamaño de partícula podría causar riesgos de seguridad, aunque reemplazar el SF con lodo puede de alguna manera evitar la posible bio-toxicidad (Yue et al., 2018)

Al realizar mezclas con hormigón con residuos de mármol en polvo y SF, como reemplazo del OPC en diferentes proporciones y con una relación agua/aglutinante constante. Se ha observado que el SF mejora la resistencia y la durabilidad del hormigón con el polvo residual de mármol al compensar el declive de sus propiedades con respecto al concreto convencional. Emplear un 20.0 % de polvo de mármol y un 10.0 % de SF como reemplazo parcial de cemento resultó en una reducción del 30.0 % de cemento que disminuye los efectos nocivos de la industria del cemento en el medioambiente (Khodabakhshian, Ghalehnovi, de Brito, & Shamsabadi, 2018).

Se prepararon morteros basados en cal hidráulica natural (NHL) mediante la introducción de isobutiltrióxido de silicio (SO) y SF como reemplazo parcial de NHL en un porcentaje del 20.0 %. En general, SF fue más efectivo que SO para mejorar las principales propiedades físicas y mecánicas de los morteros. La razón se atribuyó a la reacción puzolánica entre SF y Ca(OH)_2 , que generaba más producto de hidratos y estructura de poros refinados. Los morteros modificados SF mostraron la mayor resistencia a la compresión (Shuqiang, Qinglin, & Julin, 2018).

2.2.3.4 Cenizas residuales agrícolas.

Las cenizas residuales agrícolas o biomasa se pueden definir como la materia orgánica de origen animal o vegetal, procedente de cualquier transformación de las mismas, considerando tanto las que se producen de forma natural como artificial (Sollutia.com, s. f.-a).

Aproximadamente 140 mil millones de toneladas métricas de biomasa se producen cada año en el mundo a partir de la agricultura. Las cenizas resultantes de los desechos agrícolas como la cáscara de arroz, la caña de azúcar y otros se pueden utilizar como SCM. Se pueden mezclar con cal sola o en mezclas ternarias con OPC y lima. Si se dispara a temperaturas alrededor de 600-700 °C, las cenizas agrícolas muestran buena reactividad (Martirena & Monzo, 2018)

La ceniza de cáscara de arroz (RHA), se ha utilizado como un sustituto parcial de SF con 10.0 %, 20.0 %, 30.0 %, 40.0 % y 50.0 % para determinar su efecto sobre las propiedades mecánicas y de durabilidad de Reactive Powder Concrete (RPC) bajo curado normal y curado con vapor. Los resultados de la prueba mostraron que RPC que contiene RHA tiene un rendimiento mecánico y de durabilidad satisfactorio tanto en el curado normal como en el curado con vapor. Por lo tanto, la RHA se puede usar como material alternativo para SF para producir RPC sin comprometer las cualidades requeridas (Vigneshwari, Arunachalam, & Angayarkanni, 2018).

La ceniza de bagazo de caña de azúcar se ha implementado también como material puzolánico en la producción de hormigón de ultra alta resistencia (UHSC), sustituyendo el OPC en porcentajes del 5.0 al 20.0 % en peso. Los resultados demostraron que es posible producir UHSC con una resistencia a la compresión del cilindro de más de 160 Mpa incorporando ceniza de bagazo. Convenientemente, el 20.0 % de sustitución de la ceniza de bagazo de caña de azúcar es suficiente para producir UHSC (Rajasekar, Arunachalam, Kottaisamy, & Saraswathy, 2018).

La ceniza de combustible de aceite de palma (POFA) es un subproducto que puede ser utilizado para reemplazar parcialmente el cemento en una mezcla de concreto. Estudios han demostrado que el concreto que contiene POFA tiene mejor resistencia a la compresión, durabilidad y otras propiedades que el hormigón que contiene solo OPC. Otros investigadores han demostrado más ventajas del reemplazo de POFA en concreto en proporciones específicas, especialmente minimizando las emisiones de CO₂ y mejorando las condiciones ambientales (Hamada, Jokhio, Yahaya, Humada, & Gul, 2018).

2.2.3.5 Cenizas de lodo de tratamiento de agua residual (PTAR).

La SSA se conoce como el subproducto obtenido de la incineración de aguas residuales mecánicamente deshidratadas. Se pueden producir morteros de buena resistencia utilizando una pequeña cantidad de SSA para reemplazar el cemento. Sin embargo, la información sobre cómo la SSA residual afecta las propiedades del cemento del mortero, es limitado dado que las actividades puzolánicas de la mayoría de SSA son modestas (Zhen & Chi, 2017).

Posteriormente en la incorporación de desechos como la SSA junto con agregados de construcción y demolición reciclados (GC), en la fabricación de bloques de concreto se obtiene que las SSA aumenta la resistencia a la compresión a largo plazo y reduce la contracción por secado. Por su parte la relación álcali-sílice causada por la GC reactiva podía ser suprimida con la incorporación de la SSA. Las pruebas de lixiviación realizadas también mostraron el cumplimiento de los límites reglamentarios (Zhen, Jiang, & Chi, 2018).

2.2.4 Ensayo de fluorescencia de rayos X (XRF).

La fluorescencia de rayos X es una técnica analítica de espectroscopia atómica mayormente recomendada para la determinación de la composición elemental en muestras sólidas y también se emplea para el análisis directo de elementos minerales en líquidos. El ensayo consiste en la

emisión de rayos X de un material que ha sido excitado al ser afectado por la radiación de alta energía fluorescente, siendo el fotón emitido característico de una transición entre los electrones de un elemento en particular. Dentro de las ventajas de aplicar esta técnica destacan la facilidad de aplicarlo a muestras sólidas, se puede realizar el análisis in situ a través del equipo portátil y el tiempo mínimo requerido para realizar el análisis de la muestra. (Herrerros-Chavez, Cervera, & Morales-Rubio, 2019)

2.2.5 Estadística inferencial.

La estadística inferencial permite inferir propiedades, conclusiones o tendencias a partir de una muestra del conjunto interpretando, comparando o realizando proyecciones. Generalmente se emplea mecanismos como pruebas de hipótesis, pruebas paramétricas y no paramétricas, análisis de varianza entre otros. (Raffino, 2018)

Comprobamos el nivel de significación, si es menor que 0.05 la distribución no es normal, si es mayor que 0.05 la distribución es normal.

2.2.5.1 Prueba paramétrica.

En el problema de $k > 2$ muestras se supone que hay k muestras provenientes de k poblaciones normalmente distribuidas. Un procedimiento muy común que se utiliza cuando se prueban medias de la población se denomina análisis de varianza, o ANOVA (Walpole, Myers, & Myers, 2012)

La prueba de Shapiro-Wilk tiene como fundamento una gráfica de probabilidad en la que se considera la regresión de las observaciones sobre los valores esperados de la distribución hipotetizada, en donde su estadístico W representa el cociente de dos estimaciones de la varianza de una distribución normal. Esta prueba ha demostrado de manera general, resultados adecuados en comparación a las pruebas clásicas, pero especialmente cuando se trabaja con distribuciones

de colas cortas y con un tamaño muestral inferior a 30. (Pedrosa, Juarros-Basterretxea, Robles-Fernández, Basteiro, & García-Cueto, 2015)

La región crítica para contrastar la certeza de la prueba viene dada por donde Estadístico W, G1 y Sig es un valor de la tabla de Shapiro-Wilk correspondiente a un tamaño muestral n y a un nivel de significación (Jiménez, 2006). El contraste de normalidad se plantea en los siguientes términos:

H_0 : “los datos se encuentran normalmente distribuidos”

frente a la alternativa:

H_1 : “los datos no se encuentran normalmente distribuidos” (Walpole et al., 2012)

2.2.5.2 Prueba de Kruskal-Wallis.

La prueba de Kruskal-Wallis, es una generalización de la prueba de la suma de rangos para el caso de $k > 2$ muestras. Se utiliza para probar la hipótesis nula H_0 de que k muestras independientes provienen de poblaciones idénticas. La prueba constituye un procedimiento no paramétrico para probar la igualdad de las medias, en el análisis de varianza de un factor, cuando el experimentador desea evitar la suposición de que las muestras se seleccionaron de poblaciones normales. (Walpole et al., 2012)

2.3 Estado del arte

Gastaldini, (2015) dentro de sus investigaciones ha encontrado altos valores favorables en cuanto a los porcentajes de Ca(OH)_2 en cenizas de LPTAP a temperaturas de calcinación de 700 °C durante un periodo de residencia de 1 a 2 horas, notando que los tiempos de residencia más largos causaban que las partículas se aglomeraban a medida que se fusionaban. Los porcentajes de Ca(OH)_2 cumplen en un 90 % de los valores prescritos en las normas brasileña (ABNT NBR 15894-1) y francesa (AFNOR NF P 18-513).

El estudio de la actividad puzolánica mediante el índice de actividad de resistencia, se calcula como la relación entre el promedio de la resistencia a la compresión de las muestras que contienen cemento Portland y material puzolánico a los 28 días y el promedio de la resistencia a la compresión de las muestras que contienen solo cemento Portland a los 28 días. Los resultados de la evaluación de la actividad de la puzolana de LCC mostraron que este material tiene el potencial de ser utilizado como la puzolana. Fue posible ahorrar hasta un 38.4% del cemento Portland cuando el consumo de cemento Portland del concreto que contiene el 15% de LCC y el 7.5% de piedra caliza comparado con el concreto de referencia con la misma resistencia a la compresión. (Hagemann et al., 2019)

Otros estudios de actividad puzolánica afirman que el material con contenidos de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ mayores al 70% pueden ser empleados como material de reemplazo en mezclas que contengan cemento portland. En presencia de materiales puzolánicos, el cemento exhibe una actividad puzolánica mucho mayor en comparación con otros materiales de reemplazo porque, durante la hidratación, libera el hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) que se necesita para la reacción puzolánica. (Vouk et al., 2016)

Por medio de las investigaciones sobre el uso beneficioso de los residuos de tratamiento de agua potable, se evaluó el empleo de dicho material con alto contenido de humedad natural, como reemplazo del cemento con propiedades de curado interno. Los resultados muestran que, para una mezcla cementosa alta, hasta un 10.0 % de reemplazo con LPTAP, proporciona una resistencia y calor de hidratación equivalentes, sin afectar negativamente el tiempo de fraguado (Nowasell & Kevern, 2015).

En Brasil, se realizó un estudio de tres materiales residuales provenientes de procesos industriales: cenizas de madera, LPTAP y residuo de producción de cal (RPC), con el objetivo de

hacer compuestos para uso final en la construcción civil. Se obtuvo que los materiales presentaban resultados adecuados a los requeridos por las normas de la Asociación Brasileña de Normas Técnicas, y los tres residuos industriales combinados, pueden ser utilizados como materiales para la fabricación de ladrillos y bloques. El contenido de material orgánico presente en el LPTAP y el tamaño de las partículas de cenizas de madera influyen en la variación de las resistencias a lo largo del tiempo de curado (Andrade et al., 2016).

En Colombia, la información publicada en torno a experiencias de reutilización y tratamiento de los LPTAP es escasa. En tres PTAP de ciclo convencional de diferentes ciudades del país, se realiza el tratamiento de estos lodos donde prima el tratamiento físico por medio de la deshidratación, mientras que en el municipio de Caldas (Antioquia) se cuenta con una planta piloto para el tratamiento de lodos donde se espesan por medio de polímeros hasta su secado para su posterior disposición.

Asimismo, han sido pocas las publicaciones para la reutilización y tratamiento de LPTAP. La recuperación del aluminio contenido en los LPTAP por medio de la acidificación del medio es otra de las alternativas para el aprovechamiento de estos residuos. Se han reportado porcentajes de recuperación de aluminio mayores al 90.0 % en LPTAP, que se han utilizado en el tratamiento primario avanzado de aguas residuales domésticas alcanzando remociones de materia orgánica en DQO superiores al 85.0 %. El espesamiento y la deshidratación son tecnologías que reducen los costos de manejo y transporte de LPTAP, y la adición de polímeros sintéticos ha sido probada eficientemente para estos fines, incrementando la densidad de los flocs y la velocidad de sedimentación (Gutiérrez-Rosero et al., 2014).

La Universidad Nacional de Colombia, así como la Universidad de Medellín, proponen sistemas de tratamientos de LPTAP, a través de procesos de recuperación de aluminio de lodo en

medio ácido, sedimentabilidad y espesamiento en la Planta II de Cartago (Valle) y las instalaciones de la PTAP de Aguas & Aguas de la ciudad de Pereira en el Eje Cafetero colombiano. Se analizaron los niveles de turbiedad y solidos suspendidos, los cuales se encuentran en mayor proporción en el proceso de sedimentación. Estos estudios, se basan únicamente en la obtención de medidas que permitan la eliminación del material contaminante y no en el estudio de las propiedades que este presenta o una posible reutilización del lodo como fuente de uso en la industria cementera (Gutiérrez-Rosero et al., 2014; Ramirez, 2003).

La Universidad de la Costa y la Universidad Autónoma del Caribe, también realizan su aporte en cuanto a comparación de los óxidos presentes en cenizas de LPTAP con los óxidos encontrados en el OPC, dando como resultados diferencias considerables en los contenidos de CaO, SiO₂, Al₂O₃, MgO y Fe₂O₃, pero que de igual manera representan valores potenciales para reemplazar parte del cemento por LPTAP en diversos materiales de construcción (Pereira, Velasquez, Valencia, Ramírez, & Muñoz, 2017).

3. Parte Experimental

3.1 Obtención de la muestra

La muestra de lodo fue extraída de la planta de tratamiento de agua potable Triple A S.A. E.S.P. ubicada en la ciudad de Barranquilla (figura 1), la cual realiza el ciclo convencional de purificación produciendo lodo en todas las etapas de la potabilización. El agua cruda es captada del Río Magdalena, fuente de agua superficial, que presenta un caudal medio de 7100 m³/s (IDEAM, 2015). La muestra fue obtenida en los meses Abril-Mayo el cual es un periodo de poca precipitación, con un promedio de 26 mm con 3 días de lluvias, con el fin de minimizar la variabilidad en las características de los LPTAP.

Se recolectaron aproximadamente 20.0 lt de lodo tomado de los decantadores asignados por personal autorizado de la empresa Triple A con las respectivas botas, guantes, y bolsas plásticas, con el fin de obtener las menores alteraciones en las propiedades químicas y físicas de la muestra.

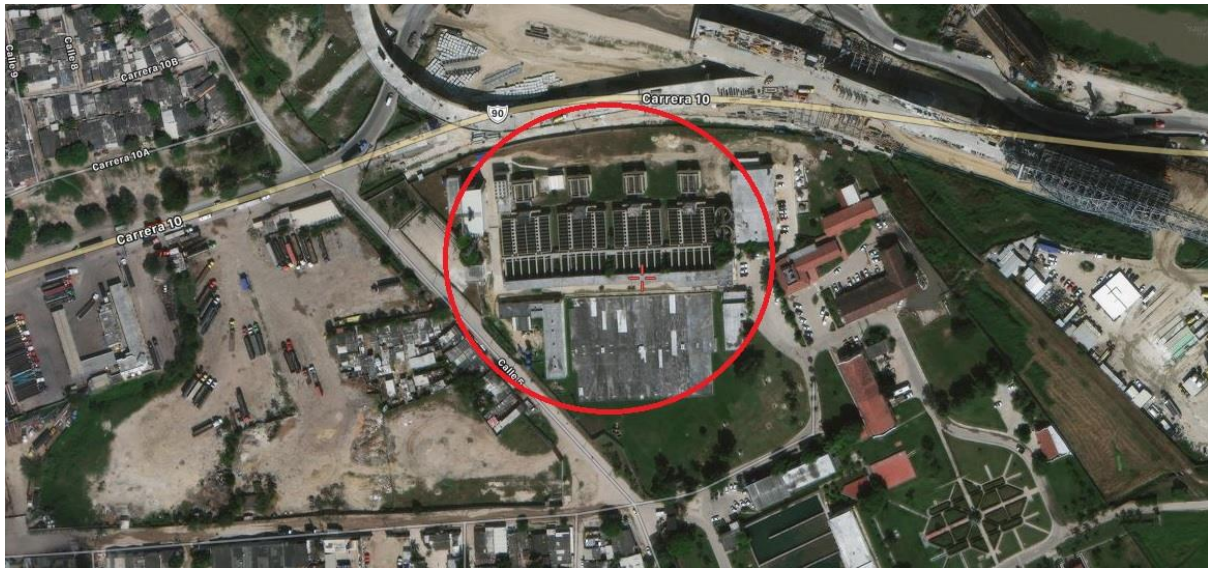


Figura 1 Vista satelital de la PTAP Triple A, adaptado de Google Earth.

3.2 Preparación de muestra

La preparación de la muestra se realizó en el laboratorio Sybolt de Colombia, el lodo fue expuesto en taras a temperatura ambiente ($29 - 32^{\circ}\text{C}$) durante un periodo de 4 días de manera que se secase. El lodo seco se pulverizó manualmente hasta obtener una pasta más suelta que fue tamizada en la malla No 40 obteniendo el LSC.

La mitad del lodo seco y tamizado se llevó al horno industrial Carbolite modelo AAF 11/18 a temperaturas de 800°C durante 3 horas, de esta forma se obtuvo el LCC. los parámetros de quema fueron adoptados con base los ensayos preliminares realizados con otros residuos y otros materiales. (Gastaldini et al., 2015; Hagemann et al., 2019; Vouk et al., 2016)

3.3 Ensayo de Fluorescencia de rayos-X

Una vez obtenidas las muestras de LCC y LSC, se ensayaron mediante XRF en el laboratorio Saybolt de Colombia para así determinar las cantidades de óxidos presentes de las muestras mencionadas.

Inicialmente se limpió la placa base con aire seco, la muestra de LSC se cuarteó para obtener una porción representativa (Figura 2A), se tamizó nuevamente en la malla No 200 (75 μm) y se tomaron 3g del LSC empleando una balanza analítica AND HR-120, a la cual se le aplican 0,6g de aglomerante (CEREOX) (Figura 2C).

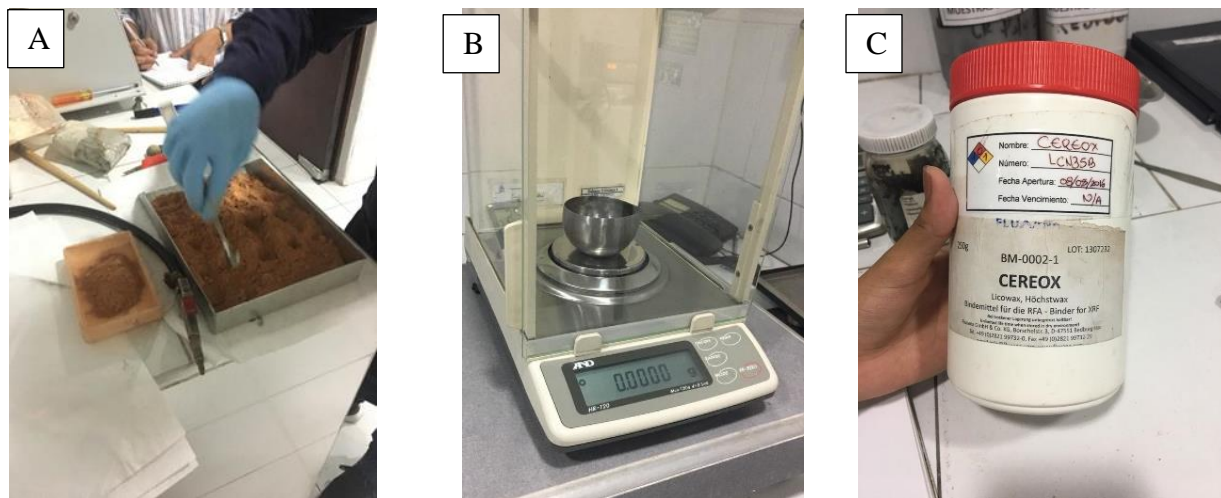


Figura 2 A: Aglomerante CEREOX, B: Balanza y crisol, C: Anillos de bronce y cilindro de compactación.

Una vez se consiguió la muestra homogénea, se preparó la base para adquirir la pastilla mediante un émbolo y los anillos de bronce de 3 cm de diámetro (figura 3A) y se compactó en la misma base de manera manual, posteriormente se llevó la pieza a la prensa XRF modelo PR-25m (figura 3B) donde se aplicaron 6 bar de presión durante un intervalo de tiempo de 30 segundos para obtener finalmente la pastilla compactada (figura 3C), el proceso fue repetido consiguiendo 2 pastillas para cada tipo de lodo.

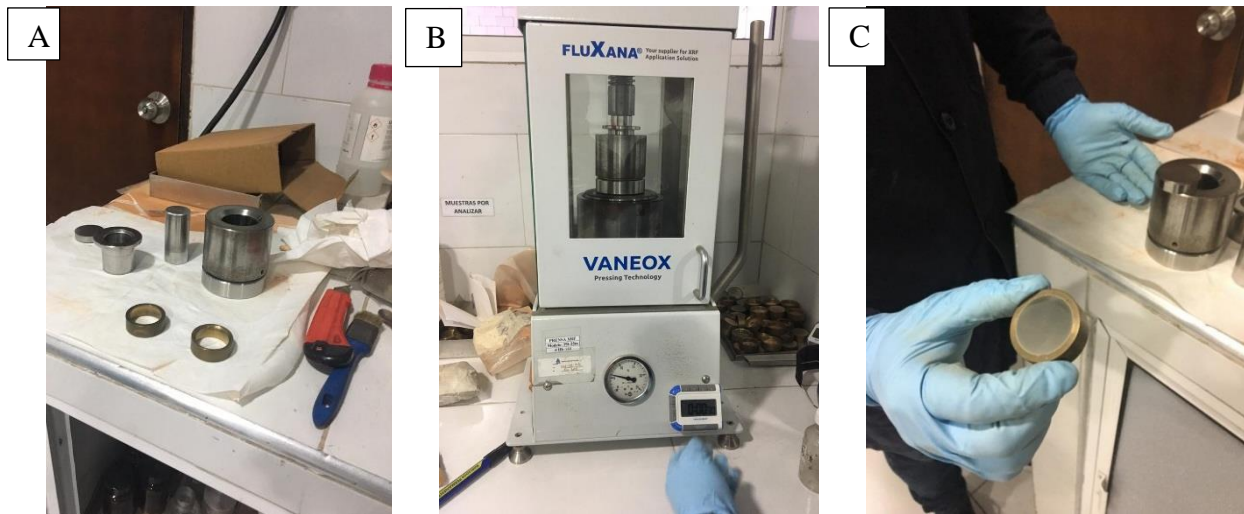


Figura 3 A: Selección de la muestra, B: Prensa XRF, C: Pastilla.

Las 4 pastillas se llevaron a la máquina de XRF Epsilon 3XL Panalytical (figura 4) cada una fue corrida 15 veces resultando 30 resultados para el LSC y 30 resultados para el LCC.

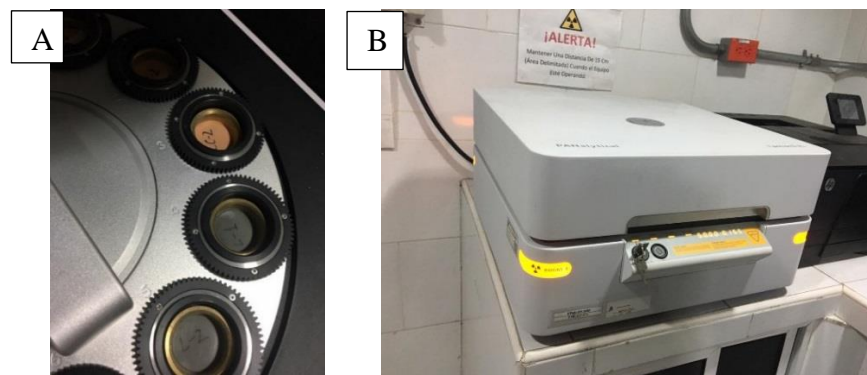


Figura 4 A: Pastillas de lodo en la máquina XRF, B: Máquina XRF.

3.4 Análisis del contenido de óxido de los lodos

Con el objetivo de realizar el análisis estadístico, se contemplaron los óxidos que componen principalmente al cemento los cuales son: CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 y MgO . Son estos minerales fundamentales en la formación mineralógica del cemento, conformando el silicato tricálcico (Alita) responsable de la resistencia a edades tempranas del cemento (2 – 3 semanas). Por otra parte, el silicato dicálcico (Belita) atribuye la resistencia final del cemento, el aluminato

tricálcico (Celita) que junto con ferroaluminato tetracálcico (Felita) se encarga del endurecimiento del material (ACI Committee, 2013).

Los resultados obtenidos mediante la XRF se analizaron por medio de estadística inferencial empleando la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis. Esta prueba considera la comparación de medianas presentes en cada muestra; para esta investigación se consideró un intervalo de confianza de 95.0 % (IBM SPSS Statistics base, Java, 22.0, 2017). También se realizó la prueba Shapiro – Wilk la cual afirma si la muestra proviene de una población normalmente distribuida o no.

Posteriormente se comparó y analizó la composición química del LSC y el LCC, aplicando las normas internacionales ASTM C114, ASTM C150 y ASTM C618 para dar validez al material en estudio. Para el caso del cemento se tomaron los valores de óxidos encontrados en la literatura de Kosmatka & Wilson, (2011).

4. Resultados y discusión

4.1 Resultados obtenidos

El equipo de XRF suministró 30 grupos de datos para las cenizas calcinadas a 800 °C y las cenizas sin calcinar (60 resultados en total). Estos resultados obtenidos son representados en la Tabla 2 mediante la mediana de cada uno de los óxidos.

Tabla 2
 Mediana de los resultados obtenidos mediante XRF

| Óxido | LCC (%) | LSC (%) |
|--------------------------------|---------|---------|
| Na ₂ O | 0.76 | 0.67 |
| MgO | 1.45 | 1.27 |
| Al ₂ O ₃ | 22.16 | 18.89 |
| SiO ₂ | 61.20 | 63.12 |
| P ₂ O ₅ | 0.21 | 0.22 |
| SO ₃ | 0.15 | 0.15 |
| K ₂ O | 2.11 | 2.30 |
| CaO | 1.25 | 1.38 |
| TiO ₂ | 0.87 | 0.96 |
| MnO | 0.13 | 0.15 |
| Fe ₂ O ₃ | 9.60 | 10.78 |
| SrO | 0.03 | 0.03 |
| BaO | 0.08 | 0.08 |

Nota: Medianas del contenido de óxidos de las muestras experimentales, adaptado de Excel

La normativa internacional ASTM C150 (Tabla 7), dentro de sus parámetros para validar los porcentajes de óxido para el OPC, requiere el análisis del contenido del MgO y SO₃. Por otra parte, la fabricación del OPC demanda la mezcla de materias primas para obtener proporciones adecuadas de cal CaO, SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃ (ACI Committee, 2013).

Por lo anterior, dentro de los óxidos obtenidos por XRF, se seleccionaron SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO, MgO y SO₃. Se observa que el lodo de la PTAP al ser calcinado aumenta los porcentajes

del Al_2O_3 y MgO y disminuye la concentración en SiO_2 , Fe_2O_3 , CaO . De igual manera se considera la desviación estándar (Tabla 3) de los resultados que, según Cervantes, (2008) se emplea para cuantificar un intervalo de confianza o límite de dispersión.

Tabla 3

Desviación estándar de la mediana del contenido de óxidos de los lodos

| Óxido | LCC (%) | LSC (%) |
|-------------------------|---------|---------|
| SiO_2 | 0.044 | 0.152 |
| Al_2O_3 | 0.047 | 0.170 |
| Fe_2O_3 | 0.031 | 0.060 |
| CaO | 0.006 | 0.005 |
| MgO | 0.007 | 0.008 |
| SO_3 | 0.002 | 0.001 |

Nota: Desviación estándar del promedio obtenido por óxido para cada lodo, adaptado de Excel.

4.2 Aplicación estadística inferencial

Los resultados obtenidos mediante el ensayo XRF fueron analizados mediante la estadística inferencial, como se muestra en la tabla 4 y 5, con el fin de determinar si tienen un comportamiento normal o no paramétrico. El análisis de los datos se realizó mediante el software estadístico (IBM SPSS Statistics base, Java, 22.0, 2017) el cual parte de la hipótesis nula (H_0) definida como “los datos se encuentran normalmente distribuidos” y la Hipótesis Alternativa (H_1) definida como “los datos no se encuentran normalmente distribuidos” para cada una de las muestras, con una confiabilidad del 95.0 %.

Tabla 4
Pruebas de normalidad para LCC

| Óxido | Estadístico ^a | Gl | Sig. | Estadístico ^b | Gl | Sig. |
|--------------------------------|--------------------------|----|-------|--------------------------|----|-------|
| SiO ₂ | 0.097 | 30 | 0.200 | 0.980 | 30 | 0.813 |
| Al ₂ O ₃ | 0.088 | 30 | 0.200 | 0.960 | 30 | 0.312 |
| Fe ₂ O ₃ | 0.081 | 30 | 0.200 | 0.990 | 30 | 0.990 |
| MgO | 0.094 | 30 | 0.200 | 0.974 | 30 | 0.655 |
| CaO | 0.124 | 30 | 0.200 | 0.918 | 30 | 0.023 |
| SO ₃ | 0.181 | 30 | 0.014 | 0.924 | 30 | 0.034 |

Nota: Pruebas de normalidad para el lodo calcinado (a) Kolmogorov -v Smirnov y (b) Shapiro – Wilk, adaptado de SPSS

Tabla 5
Pruebas de normalidad para LSC

| Óxido | Estadístico ^a | Gl | Sig. | Estadístico ^b | Gl | Sig. |
|--------------------------------|--------------------------|----|-------|--------------------------|----|-------|
| SiO ₂ | 0.144 | 30 | 0.113 | 0.893 | 30 | 0.006 |
| Al ₂ O ₃ | 0.259 | 30 | 0.000 | 0.779 | 30 | 0.000 |
| Fe ₂ O ₃ | 0.151 | 30 | 0.080 | 0.927 | 30 | 0.040 |
| MgO | 0.103 | 30 | 0.200 | 0.975 | 30 | 0.694 |
| CaO | 0.138 | 30 | 0.147 | 0.965 | 30 | 0.417 |
| SO ₃ | 0.174 | 30 | 0.021 | 0.932 | 30 | 0.056 |

Nota: Pruebas de normalidad para el lodo sin calcinar (a) Kolmogorov - Smirnov y (b) Shapiro – Wilk, adaptado de SPSS

Teniendo un tamaño muestral de 30 datos para el LSC y 30 para el LCC, se toma como referencia los resultados arrojados por la prueba de Shapiro-Wilk ya que la $Gl \leq 30$. Se observa que el valor sig para algunos de los óxidos es menor a 0.05, por ende, se acepta H_i y se rechaza H_o .

Se puede afirmar que los resultados obtenidos de no arrojan una distribución normal, lo cual se atribuye a los efectos físicos de la matriz (propiedades físicas de la muestra, como el tamaño de la partícula), los efectos químicos de la matriz (efectos de absorción de la radiación emitida por otro elemento del entorno; solapamiento de líneas de diferentes elementos...) y los contenidos de varios componentes en torno al 10.0 % que afectan la transmisión de rayos-X. En consecuencia, es de gran importancia el diseño experimental y metodológico, desde la obtención de la muestra, su preparación, molienda, homogeneización y calibración del equipo para ese tipo de muestra con el fin de obtener resultados representativos (Gutiérrez Ginés & Ranz, 2010).

Por consiguiente, se realiza la prueba estadística no paramétrica Kruskal-Wallis la cual generaliza el análisis de varianza para permitir prescindir del supuesto, de que el grupo de datos proviene de la misma población (Aragon, 2016). Para la presente investigación se evaluó la mediana de los óxidos dentro de los dos niveles (LCC y LSC) donde el valor sig es menor que 0.05, es decir, existe una diferencia estadística significativa entre las medianas con un nivel del 95.0 % de confianza. En la Tabla 6, se presenta un ejemplo de los resultados obtenidos al aplicar la prueba no paramétrica Kruskal-Wallis, particularmente para el SiO.

Tabla 6
Resumen de contraste de hipótesis LCC para SiO₂

| | Hipótesis nula | Prueba | Sig | Decisión |
|---|---|---|-------|---------------------------|
| 1 | La distribución de OXIDO DE SILICIO es la misma entre las categorías de LCC | Prueba de Kruskal Wallis para muestras independientes | 0.000 | Rechace la hipótesis nula |

Nota: Resultado prueba de Kruskal Wallis en el SiO₂, adaptado de SPSS.

Las discrepancias presentadas en los resultados de XRF para las muestras de los LPTAP se denotan mayormente a través de los diagramas de caja y bigotes, los cuales permiten analizar el comportamiento de las medianas y corroborar la distribución atípica de los datos.

Teniendo en cuenta las amplitudes de las cajas, se nota como los datos se encuentran alejados de la mediana, además que las longitudes de los bigotes muestran que los resultados obtenidos presentan valores atípicos por fuera de los rangos y cuartiles determinados, corroborando así que no presentan una normal distribución.

Al comparar y analizar los resultados, se puede establecer que el porcentaje de SiO_2 (Figura 5) disminuyó en un 2.0 % al ser calcinado (61,2 %). El agua captada de las PTAP, que posteriormente se potabiliza, presentan diversos tipos de sólidos suspendidos disueltos, principalmente arcillas. Las arcillas tienen como una de sus características principales un elevado contenido de sílice, esta puede ser una explicación al alto contenido del SiO_2 en los LPTAP (Pereira et al., 2017)

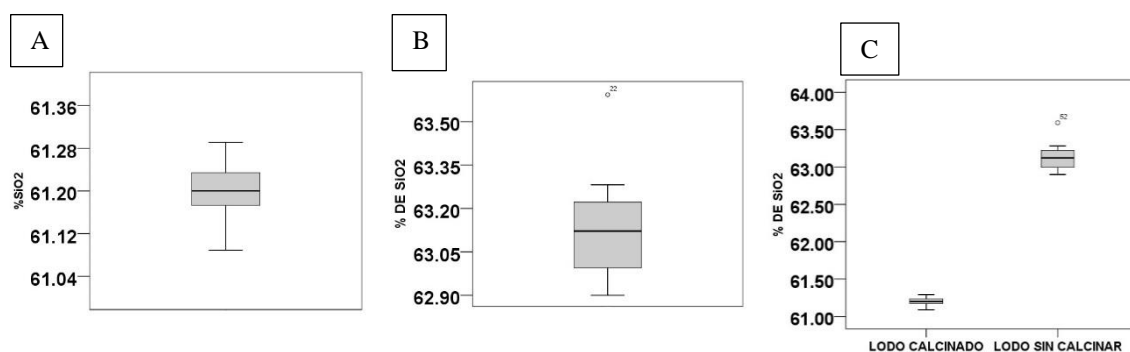


Figura 5 Diagramas de caja y bigote para el SiO_2 (A) LCC, (B) LSC, (C) Comparación de los lodos, adaptado de SPSS.

Con respecto al Al_2O_3 , el LCC aumento en un 3.26 % en comparación con el LSC (Figura 6). Este contenido de óxido en ambos LPTAP podría atribuirse a coagulantes como el policloruro de aluminio, que se emplea en las PTAP para remover los sólidos en suspensión y partículas orgánicas (Perez, 2018).

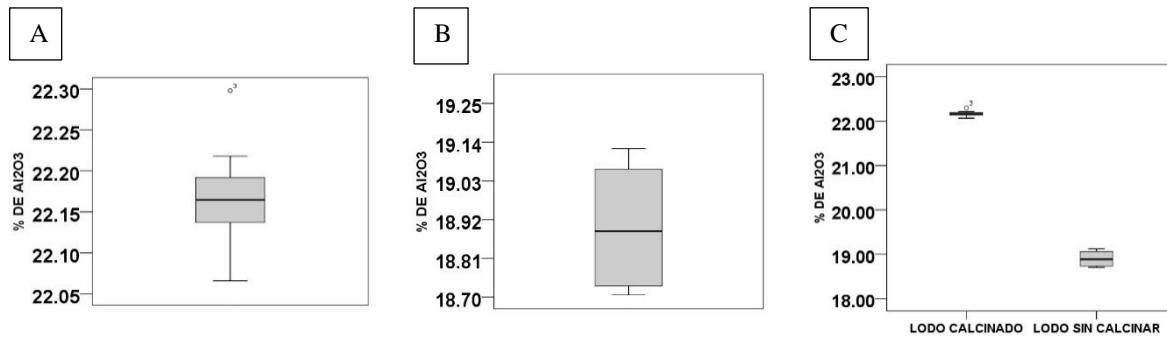


Figura 6 Diagramas de caja y bigote para el Al_2O_3 (A) LCC, (B) LSC, (C) Comparación de los lodos, adaptado de SPSS.

Como anteriormente se mencionó, las arcillas se encuentran presentes en el proceso de captación del agua, por lo que los lodos de las PTAP presentan porcentajes de minerales ferromagnesianos, que son disueltos al añadir sales de aluminio o hierro (Pereira et al., 2017). El lodo al ser calcinado muestra una disminución del 1.2 % en paralelo con el LSC (Figura 7).

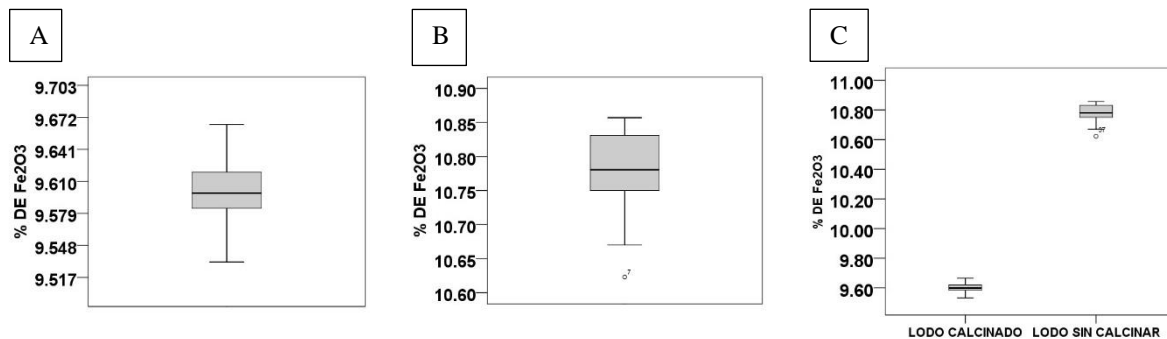


Figura 7 Diagramas de caja y bigote para el Fe_2O_3 (A) LCC, (B) LSC, (C) Comparación de los lodos, adaptado de SPSS.

Analizando las participaciones de CaO obtenidos, (Figura 8) se denota el bajo contenido en los LPTAP tanto calcinado como sin calcinar, esta disminución puede darse principalmente en el proceso de ablandamiento del agua cuando se agrega CaO o $Ca(OH)_2$, como productos químicos dosificados en forma de suspensión o disolución, provocando así la precipitación del calcio como carbonato de calcio y del magnesio como hidróxido (Companhia Estadual de Tecnologia de Saneamento Básico e de Controle de Poluição das Águas, 2001) con el fin de reducir el sabor,

olor y color del agua al eliminar la materia en suspensión y, por tanto, la turbiedad de la misma (Calcinor, 2015).

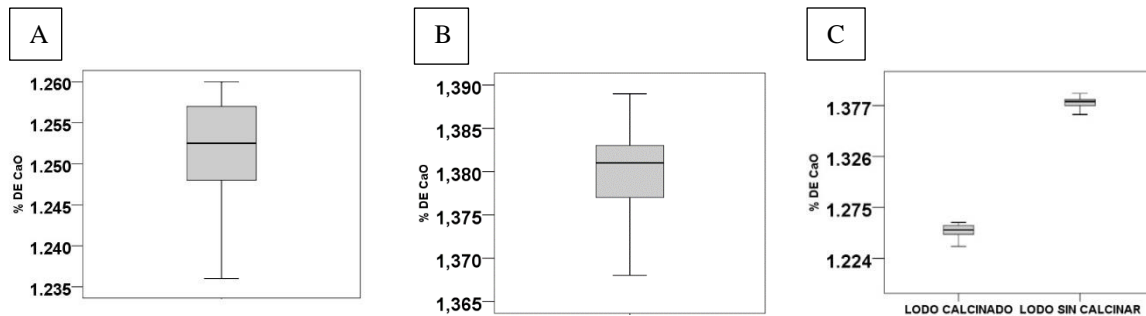


Figura 8 Diagramas de caja y bigote para el CaO (A) LCC, (B) LSC, (C) Comparación de los lodos, adaptado de SPSS.

En el caso del MgO se puede notar en la Figura 9 que el contenido presente en los LPTAP es semejante ya que no aumentan al ser calcinados en gran proporción. El magnesio se encuentra presente en las aguas superficiales como ion Mg^{2+} y junto con el calcio, provoca la dureza del agua. Proviene principalmente de los minerales ferromagnésicos y de algunas rocas que contienen carbonatos. Se encuentra también en la clorofila, en diferentes compuestos organometálicos y en materia orgánica (Beita Sandí, 2008).

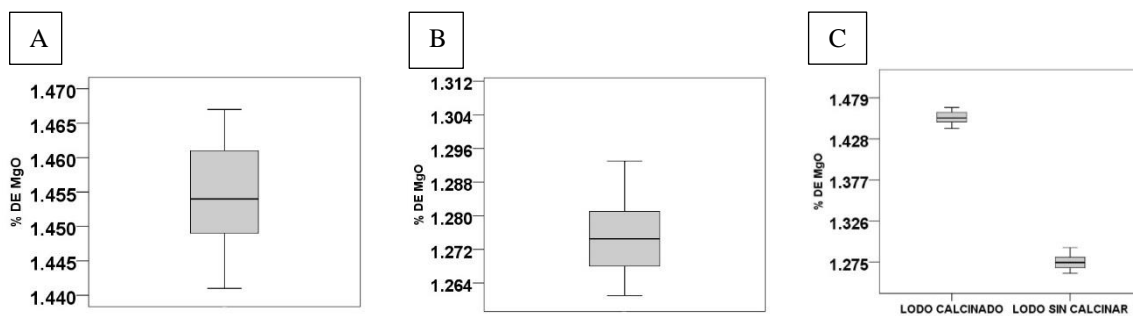


Figura 9 Diagramas de caja y bigote para el MgO (A) LCC, (B) LSC, (C) Comparación de los lodos, adaptado de SPSS.

Las concentraciones de SO_3 en ambas muestras, presentan un porcentaje similar (Figura 10). La cantidad de SO_3 expone un menor contenido dentro de los óxidos que conforman la matriz de

cemento. Las aguas tratadas al no exhibir materia en suspensión, los compuestos asociados al aluminio y azufre no quedan retenidos en los lodos procedentes del tratamiento de agua, sino que se disociaran y recircularan al proceso de potabilización junto con el agua sobrenadante que sale del equalizador, espesador y filtro (Torres & Nicolas, 2018).

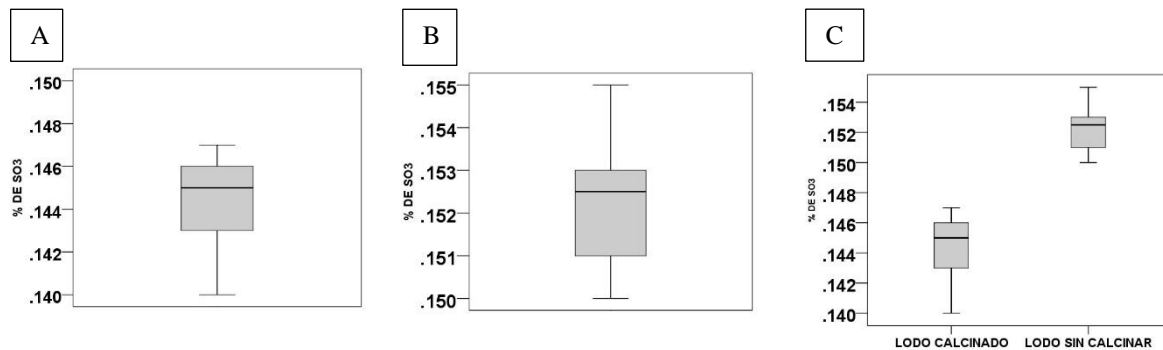


Figura 10 Diagramas de caja y bigote para el SO₃ (A) LCC, (B) LSC, (C) Comparación de los lodos, adaptado de SPSS.

A manera de resumen se presentan los porcentajes de óxidos conseguidos mediante XRF en el diagrama de barras (Figura 11), en paralelo con los porcentajes de óxidos presentes en el cemento hallados en la literatura según Kosmatka & Wilson, (2011).

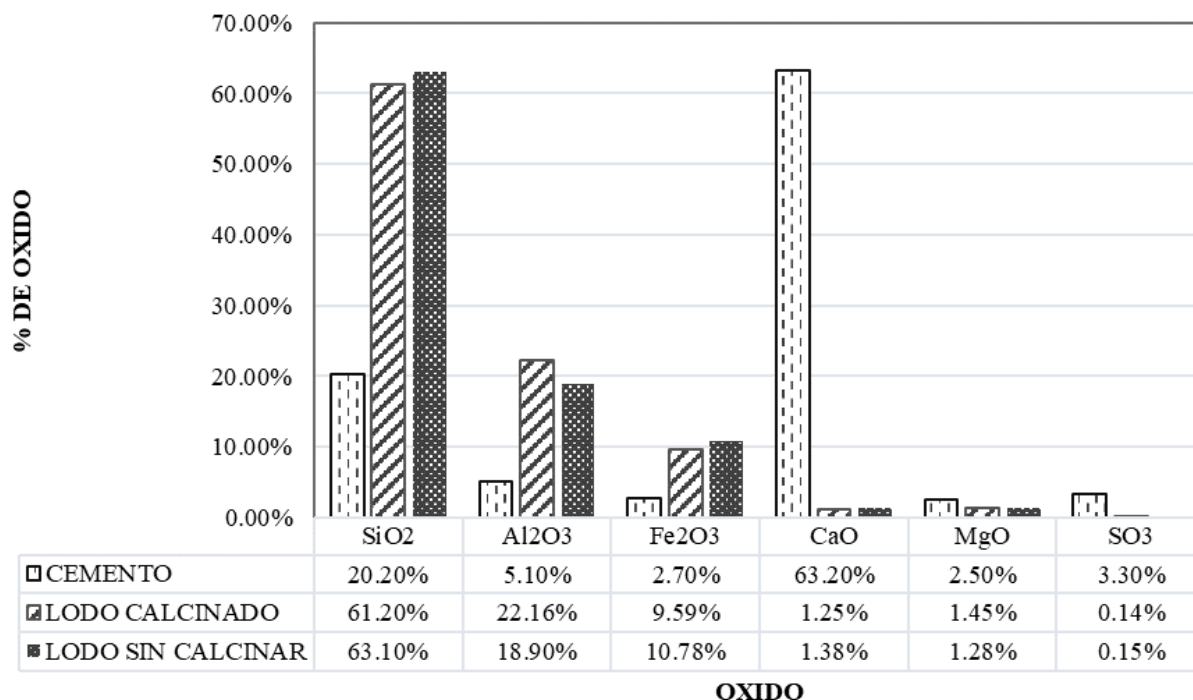


Figura 11 Comparación de los datos obtenidos mediante XRF y el contenido de óxidos del cemento, adaptado de Excel.

4.3 Comparación del contenido de óxido de los lodos y el cemento.

Una vez obtenidos los porcentajes de óxidos presentes en los lodos de PTAP y analizados estadísticamente, se comparan con la norma internacional American Society for Testing and Materials, ASTM C150 “Standard Specification for Portland Cement” (Tabla 7) con el fin de establecer si los LPTAP cumplen con los estándares de la composición química del OPC.

Se establece según la ASTM C150 un porcentaje de MgO máximo del 6.00 % para el OPC, teniendo en cuenta los resultados arrojados por el ensayo XRF, se demuestra que el porcentaje del LCC y LSC cumple con la normativa, ya que contienen menor cantidad de MgO, en específico el LSC.

Con la finalidad de comparar el contenido de SO₃ de los LPTAP con la normativa ASTM C150, se realizó el cálculo del valor C₃A (aluminato tricálcico) conocido como Celita el cual es

un mineral conformado por el CaO junto con el Al₂O₃, encargado de darle al mortero y concreto el endurecimiento (ACI Committee, 2013):

$$C_3A = (2.65 * \%Al_2O_3) - (1.692 * \%Fe_2O_3)$$

$$\text{Lodo calcinado } C_3A = (2.65 * 22.16\%) - (1.692 * 9.59\%) = 42.0 \%$$

$$\text{Lodo sin calcinar } C_3A = (2.65 * 18.8\%) - (1.692 * 10.7\%) = 31.0 \%$$

Teniendo en cuenta que el C₃A dio mayor del 8.00 % la norma ASTM C150 establece un porcentaje de SO₃ máximo del 3.50 % para el OPC, para el caso de los lodos en estudio cumple con lo establecido ya que el contenido de óxidos es menor al 3.50 %.

Tabla 7

Requisitos de la composición química del cemento ASTM C150

| Tipo de cemento | Método aplicable | I y IA | II y IIA | II(MH) y II(MH)A | III y IIIA | IV | V |
|---|------------------|--------|----------|------------------|------------|----------|----------|
| Óxido de aluminio (Al_2O_3), max, % | C114 | ... | 6.0 | 6.0 | ... | ... | ... |
| Óxido de hierro (Fe_2O_3), max, % | C114 | ... | 6.0 | 6.0 | ... | 6.5 | ... |
| Óxido de magnesio (MgO), max, % | C114 | 6.0 | 6.0 | 6.0 | 6.0 | 6.0 | 6.0 |
| Trióxido de azufre (SO_3), max, % | C114 | | | | | | |
| Cuando (C_3A) es 8.0 % o menos | | 3.0 | 3.0 | 3.0 | 3.5 | 2.3 | 2.3 |
| Cuando (C_3A) es mayor 8.0 % | | 3.5 | <i>F</i> | <i>F</i> | 4.5 | <i>F</i> | <i>F</i> |
| Pérdidas por ignición max, % | C114 | | | | | | |
| Cuando no tiene piedra caliza | | 3.0 | 3.0 | 3.0 | 3.0 | 2.5 | 3.0 |
| Cuando tiene piedra caliza | | 3.5 | 3.5 | 3.5 | 3.5 | 3.5 | 3.5 |

Nota: Porcentaje del contenido de óxidos presentes para los diversos tipos de cemento, adaptado de ASTM C150

^FNo aplica.

Los valores de óxidos presentes en los lodos mediante XRF se hallan parametrizados por medio de la norma ASTM C114 (Tabla 8). Esta norma valida la variación máxima permisible entre duplicados para los óxidos. Los porcentajes de óxidos obtenidos para los lodos no superan el máximo permitido (Tabla 9), por ello se aceptan los resultados como apropiados.

Tabla 8

Variaciones máximas permitidas para los resultados de XRF

| Compuesto | Máxima diferencia entre duplicados | Máxima diferencia entre el promedio de duplicados de los valores certificados |
|--------------------------------|---------------------------------------|---|
| SiO ₂ | 0.16 | ± 0.2 |
| Al ₂ O ₃ | 0.20 | ± 0.2 |
| Fe ₂ O ₃ | 0.10 | ± 0.10 |
| CaO | 0.20 | ± 0.3 |
| MgO | 0.16 | ± 0.2 |
| SO ₃ | 0.10 | ± 0.1 |

Nota: Variaciones máximas permitidas para los resultados obtenidos mediante RXF, adaptado de ASTM C114

Tabla 9
 Aplicación norma ASTM C114 para los óxidos del LCC.

| Compuesto | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | SO ₃ |
|--------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------|---------|-----------------|
| Max (%) | 0.613 | 0.223 | 0.0966 | 0.0126 | 0.0147 | 0.0015 |
| Min (%) | 0.611 | 0.221 | 0.0953 | 0.0124 | 0.0144 | 0.0014 |
| Diferencia | 0.00202 | 0.00232 | 0.00133 | 2.4E-04 | 2.6E-04 | 7E-05 |
| ASTM C114 | 0.16 | 0.2 | 0.1 | 0.2 | 0.16 | 0.1 |

Nota: Diferencia máxima permitida entre duplicados de los porcentajes obtenidos en el ensayo XRF, adaptado de Excel.

Mediante la sumatoria del SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃, la norma ASTM C618 (Tabla 10), define las características de los materiales puzolánicos, que para este caso arroja un 92.96% en el LCC, posesionando el material como puzolana de clase F, ya que presenta bajos contenidos de CaO. Sin embargo, es necesario la realización del ensayo de la actividad puzolánicas, para evaluar el potencial cementante del LCC y LSC.

Tabla 10
 Requerimientos químicos para las puzolanas

| | Class | | |
|--|-------|------|------|
| | N | F | C |
| (SiO ₂) + (Al ₂ O ₃) +(Fe ₂ O ₃), min, % | 70.0 | 70.0 | 50.0 |
| Trióxido de azufre (SO ₃), max, % | 4.0 | 5.0 | 5.0 |
| Contenido de humedad, max, % | 3.0 | 3.0 | 3.0 |
| Pérdidas por ignición, max, % | 10.0 | 6.0 | 6.0 |

Nota: Clasificación de las puzolanas mediante la composición química, adaptado de ASTM C618.

Para los valores del CaO se contrastan los datos obtenidos mediante la literatura en la Tabla 11 donde se muestra un porcentaje máximo de 65.20 para el OPC. Como se puede observar en la Tabla 2 el CaO presenta un contenido mínimo en LCC (1.25 %) y en el LSC (1.38 %).

Tabla 11
Composición química del cemento

| Tipo de cemento | Composición química, % | | | | | |
|-----------------|------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------|---------|-----------------|
| | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | SO ₃ |
| I (min-max) | 19.0-21.8 | 3.9-6.1 | 2.0-3.6 | 61.5-65.2 | 0.8-4.5 | 2.0-4.4 |
| I (media) | 20.2 | 5.1 | 2.7 | 63.2 | 2.5 | 3.3 |
| II (min-max) | 20.0-22.5 | 3.8-5.5 | 2.6-4.4 | 61.3-65.6 | 0.6-4.5 | 2.1-4.0 |
| II (media) | 20.9 | 4.6 | 3.3 | 63.7 | 2.0 | 2.9 |
| III (min-max) | 18.6-22.1 | 3.4-7.3 | 1.3-4.2 | 61.6-64.9 | 0.8-4.3 | 2.6-4.9 |
| III (media) | 20.4 | 4.8 | 2.9 | 63.3 | 2.2 | 3.6 |

Nota: Porcentajes de los principales óxidos presentes en el cemento, adaptado de Kosmatka & Wilson, (2011)

Finalmente, el análisis muestra que para el LCC y LSC, los porcentajes de MgO y SO₃ cumplen con los límites exigidos por la norma ASTM C150. Por su parte el SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃ revelan un alto contenido que lo clasifica como puzolana de clase F, a diferencia del CaO el cual expone un porcentaje mínimos en los lodos de PTAP.

4.3.1 Comparación de los resultados con otros trabajos.

Investigaciones preliminares con lodos permiten realizar una comparación de los resultados de óxidos derivados mediante XRF para LCC y LSC. Como se aprecia en la Tabla 12 se tienen los valores del contenido de óxidos del lodo en estudio contrastados con los ensayos de XRF del LCC a 800 °C los cuales fueron captados de la misma planta, por ende, se observa la similitud en

los resultados obtenidos. Para el LCC a 700°C se presenta un aumento en los contenidos de Al_2O_3 y SO_3 , caso contrario para el SiO el cual presenta valores menores. Las diferencias pueden atribuirse a la fuente de captación y de la energía empleada para la calcinación.

Tabla 12
Comparación del porcentaje de óxidos de LCC con otros estudios

| Composición Química | LODO A 800°C | LODO A 800 °C | LODO A 700°C |
|-------------------------|---------------------------|--|--|
| | (LPTAP en estudio) (%) | (Daza & Medina, 2018) ^a (%) | (Hagemann et al., 2019) ^b (%) |
| SiO_2 | 61.20 | 60.41 | 44.70 |
| Al_2O_3 | 22.16 | 21.01 | 33.90 |
| Fe_2O_3 | 9.59 | 10.95 | 11.80 |
| CaO | 1.25 | 1.55 | 0.41 |
| MgO | 1.45 | 1.45 | 0.58 |
| SO_3 | 0.14 | 0.23 | 4.03 |

Nota: a) Óxidos del trabajo Daza (Daza & Medina, 2018) b) Óxidos del trabajo Hageman (Hagemann et al., 2019)

Para el LSC, como se muestra en la Tabla 13, se notan las variaciones en el contenido de óxidos presentes, que pueden atribuirse a la fuente de obtención del LPTAP, de los sólidos en suspensión presentes en el agua bruta y de los diversos químicos y productos que se emplean durante el proceso de potabilización del agua.

Tabla 13
Comparación del porcentaje de óxidos para LSC con otros estudios

| Composición Química | Lodo Barranquilla (LPTAP en estudio) (%) | Lodo México (Ceron et al., 2013) ^a (%) | Lodo India (Ahmad et al., 2016) ^b (%) |
|--------------------------------|--|--|---|
| SiO ₂ | 63.10 | 33.23 | 52.78 |
| Al ₂ O ₃ | 18.90 | 33.01 | 14.38 |
| Fe ₂ O ₃ | 10.78 | 3.34 | 5.20 |
| CaO | 1.38 | 0.65 | 4.39 |
| MgO | 1.28 | 0.63 | 3.08 |
| SO ₃ | 0.15 | ----- | ---- |

Nota: a) Óxidos del trabajo Cerón (Ceron et al., 2013), b) Óxidos del trabajo Ahmad (Ahmad et al., 2016).

Estos resultados pueden emplearse como comparación para poder constatar que los datos obtenidos tienen validez. De esta manera se nota que los valores obtenidos pueden variar dependiendo de las características del agua bruta, del coagulante utilizado en la PTAP, y del tratamiento que se le da en las diferentes plantas de potabilización, además del método aplicado al momento de tomar la muestra hasta el punto donde sería analizado, variando así el contenido de óxidos.

5. Conclusión

Al realizar el análisis estadístico comparativo de óxidos presentes en el LCC y LSC se pudo determinar que ninguna de las muestras presentó una distribución normal. Los LPTAP presentaron los principales óxidos contenidos en los materiales de construcción CaO , Al_2O_3 , SiO_2 y FeO_3 .

Mediante los diagramas de caja y bigotes se logra apreciar en mayor proporción el comportamiento de los óxidos; de igual manera se trabajan con los datos obtenidos ya que se encuentran dentro de los parámetros establecidos por la norma ASTM C114.

Al ser comparar los óxidos presentes en los lodos con el contenido de los óxidos presentes en el cemento especificados en las normas internacionales, los porcentajes de MgO y SO_3 cumplen para lo establecido en la norma ASTM C150. El material presenta características puzolánicas clase F con bajos contenidos de CaO , por lo que los LPTAP estudiados pueden poseer algunas propiedades cementantes, según la norma ASTM C618.

Considerando la composición química de los LPTAP, en el LSC se encontraron porcentajes de compuestos que pueden afectar la calidad del concreto y mortero, como es el caso de materia orgánica. Por ello puede el LCC emplearse como SCM, en proporciones óptimas de manera que no afecte las propiedades físicas del concreto o mortero.

Debido al bajo contenido de CaO en los LPTAP, se recomienda evaluar el uso del material como mortero, ya que demanda menores valores de resistencia a la compresión. Para el caso del concreto podrían realizarse los ensayos de caracterización físico – mecánica y actividad puzolánica al emplear adiciones de CaO .

6. Referencias

- ACI Committee. (2013). *Cementitious Materials for Concrete*. ACI Education Bulletin E3-13.
- ACI Committee E-701. (2013). ACI Education Bulletin E3-13 Cementitious Materials for Concrete. Recuperado 15 de mayo de 2019, de <https://docplayer.net/30078272-Aci-education-bulletin-e3-13-cementitious-materials-for-concrete.html>
- Ahmad, T., Ahmad, K., & Alam, M. (2016). Characterization of Water Treatment Plant's Sludge and its Safe Disposal Options. *Procedia Environmental Sciences*, 35, 950-955.
<https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.07.088>
- American Society for Testing and Materials. (2018). ASTM C618-17a Especificación estándar para Ceniza volante de carbón y puzolana natural cruda o calcinada para su uso en hormigón. Recuperado 15 de mayo de 2019, de <https://www.astm.org/Standards/C618-SP.htm>
- Andrade, C. de, Myrriane, V., Silva, D. A. da, Mayer, S. L. S., Simetti, R., & Marchiori, F. (2016). Compósito para a construção civil a partir de resíduos industriais. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 21(2), 321-329. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620160002.0031>
- Aragon, L. (2016). Introducción a la estadística no paramétrica. En *Estadística en el área de las Ciencias Sociales y Administrativas* (1.^a ed., p. 523). Alfaomega.
- ASTM C150, Standard Specification for Portland Cement.
- ASTM C114, Standard Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement
- Beita Sandí, W. (2008). "Caracterización fisicoquímica de las aguas superficiales de la cuenca del río Rincón en la Península de Osa, Puntarenas, Costa Rica". Recuperado de <http://www.kerwa.ucr.ac.cr/handle/10669/334>

- Calcinor. (2015). Las funciones que realiza la cal en el tratamiento de aguas. Recuperado 16 de mayo de 2019, de <https://www.calcinor.com/es/actualidad/2017-03-16/cal-tratamiento-de-aguas/>
- Cavada, C. (2017, junio 1). Contaminación ambiental: ¿Cómo afecta a nuestro sistema respiratorio? Recuperado 4 de abril de 2019, de www.ipsuss.cl website:
<http://www.ipsuss.cl/ipsuss/site/artic/20170601/pags/20170601165418.html>
- Ceron, O., Millan, S., Espejel, F., Rodriguez, A., & Ramirez, R. (2013). *APLICACIÓN DE LODOS DE PLANTAS POTABILIZADORAS PARA ELABORAR MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN*.
- Companhia Estadual de Tecnologia de Saneamento Básico e de Controle de Poluição das Águas. (2001). Capítulo 8. Tratamiento de agua. En *Operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de agua* (Vol. 1 y 2). lima.
- DANE. (2018). Estadísticas de cemento gris. Recuperado 3 de abril de 2019, de <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/construccion/estadisticas-de-cemento-gris>
- Daza, N., & Medina, A. (2018). *ANÁLISIS COMPARATIVO DEL CONTENIDO DE ÓXIDOS PRESENTES EN LAS CENIZAS DE LODOS DE PTAP Y EL CEMENTO PORTLAND TIPO UNO*. Universidad de la costa, Barranquilla.
- Decreto 302 de 2000. Constitución política, Colombia, 25 de febrero de 2000.
- Decreto 838 de 2005. Disposición final de residuos sólidos, Colombia, 23 de marzo de 2005
- DECRETO 1594 DE 1984. Uso del agua y residuos líquidos, Colombia, junio de 1984.
- Decreto 2104 de 1983, Constitución política, Colombia, 26 de julio de 1983.
- Decreto 2811 de 1974. Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al

Medio Ambiente, Colombia, 18 de diciembre de 1974.

Decreto 4002 de 2004. Revisión de los planes de ordenamiento territorial, Colombia, 30 de noviembre de 2004.

Espinoza, L., & Escalante, I. (2008). Comparación de las propiedades del concreto utilizando escoria de alto horno como reemplazo parcial y total del cemento Pórtland ordinario.

Nexo Revista Científica, 21(01), 11-18. <https://doi.org/10.5377/nexo.v21i01.405>

FICEM. (2013). *FICEM una mirada al futuro*. Federacion interamericana del cemento.

Fonseca, L. (2016). *Empleo de ceniza volante colombiana como material cementicio suplementario y sus efectos sobre la fijación de cloruros en concretos*. Universidad nacional de Colombia, Bogota.

Gang, X., & Xianming, S. (2018). Characteristics and applications of fly ash as a sustainable construction material: A state-of-the-art review. *Resources, Conservation and Recycling*, 136, 95-109. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.04.010>

Gastaldini, A. L. G., Hengen, M. F., Gastaldini, M. C. C., do Amaral, F. D., Antolini, M. B., & Coletto, T. (2015). The use of water treatment plant sludge ash as a mineral addition. *Construction and Building Materials*, 94, 513-520. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.038>

Gutiérrez Ginés, M. J., & Ranz, I. (2010). *Utilización de un equipo portátil de fluorescencia de rayos X para el estudio de metales pesados en suelos: puesta a punto y aplicación a vertederos*. Recuperado de <https://digital.csic.es/handle/10261/73106>

Gutiérrez-Rosero, J. A., Ramírez-Fajardo, Á. I., Rivas, R., Linares, B., & Paredes, D. (2014). Tratamiento de lodos generados en el proceso convencional de potabilización de agua. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 13(25), 13-27.

- Hagemann, S. E., Gastaldini, A. L. G., Cocco, M., Jahn, S. L., & Terra, L. M. (2019). Synergic effects of the substitution of Portland cement for water treatment plant sludge ash and ground limestone: Technical and economic evaluation. *Journal of Cleaner Production*, 214, 916-926. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.324>
- Hamada, H., Jokhio, G. A., Yahaya, F., Humada, A., & Gul, Y. (2018). The present state of the use of palm oil fuel ash (POFA) in concrete. *Construction and Building Materials*, 175, 26-40. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.227>
- Herreros-Chavez, L., Cervera, M. L., & Morales-Rubio, A. (2019). Direct determination by portable ED-XRF of mineral profile in cocoa powder samples. *Food Chemistry*, 278, 373-379. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.11.065>
- Higuchi, T., Morioka, M., Yoshioka, I., & Yokozeki, K. (2014). Development of a new ecological concrete with CO₂ emissions below zero. *Construction and Building Materials*, 67, 338-343. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.029>
- IDEAM. (2015, julio 6). Atlas cuenca del rio magdalena version final. Recuperado 3 de abril de 2019, de https://wiki.ead.pucv.cl/Atlas_cuenca_del_rio_magdalena_version_final.pdf
- Java. (2017). IBM SPSS Statistics Base 22.0 (Versión 22). Recuperado de <https://ibm-spss-statistics-base.uptodown.com/windows>
- Jiménez, A. (2006). Contraste de Shapiro-Wilk. Recuperado 15 de mayo de 2019, de Xataka Ciencia website: <https://www.xatakaciencia.com/matematicas/contraste-de-shapiro-wilk>
- Khodabakhshian, A., Ghalehnovi, M., de Brito, J., & Shamsabadi, E. (2018). Durability performance of structural concrete containing silica fume and marble industry waste powder. *Journal of Cleaner Production*, 170, 42-60. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.116>

- Kosmatka, S., & Wilson, M. (2011). *Design and Control of Concrete Mixtures 15th (Fifteenth) Edition* (Edición: 15th Edition). Portland Cement Assn.
- Latorre, A. (2018). *La industria del cemento en Colombia determinantes y comportamiento de la demanda (1996-2005)*. Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá.
- Ley 9 de 1979. Medidas sanitarias, Colombia, 24 de enero de 1979.
- Lizarazo Marriaga, J., & Claisse, P. (2011). Influencia de la adición de escoria de alto horno en la penetración de los cloruros en el concreto. *Ingeniería e Investigación*, 31(2), 38-47.
- Martirena, F., & Monzo, J. (2018). Vegetable ashes as Supplementary Cementitious Materials. *Cement and Concrete Research*, 114, 57-64.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.08.015>
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2005). *Política Ambiental Para la Gestión Integral de Residuos o Desechos Peligrosos*. Bogotá.
- Molina, N. F., Tarifa, O. I. F., & Mendoza, L. V. (2015). Residuos agroindustriales como adiciones en la elaboración de bloques de concreto no estructural. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 25(2), 2.
- Montaño, A. M., González, C. P., Castro, D., Gualdron, G., & Atencio, R. (2017). Inclusion of geopolymers derivate from fly ash and pumice in reinforced concrete. *Journal of Physics: Conference Series*, 935, 012016. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/935/1/012016>
- Nowasell, Q. C., & Kevern, J. T. (2015). Using Drinking Water Treatment Waste as Low-Cost Internal Curing Agent for Concrete. *ACI Materials Journal*, 112(1). Recuperado de <https://trid.trb.org/view/1343930>

- Paris, J. M., Roessler, J. G., Ferraro, C. C., DeFord, H. D., & Townsend, T. G. (2016). A review of waste products utilized as supplements to Portland cement in concrete. *Journal of Cleaner Production*, *121*, 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.013>
- Pedrosa, I., Juarros-Basterretxea, J., Robles-Fernández, A., Basteiro, J., & García-Cueto, E. (2015). Pruebas de bondad de ajuste en distribuciones simétricas, ¿qué estadístico utilizar? *Universitas Psychologica*, *14*(1), 245-254. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.upsy14-1.pbad>
- Pereira, Y. A., Velasquez, S. R., Valencia, J. J., Ramírez, M. C., & Muñoz, A. P. (2017). Análisis comparativo de la concentración de óxidos presentes en el cemento portland y lodos de plantas de tratamiento de agua potable. *Afinidad*, *74*(577). Recuperado de <https://www.raco.cat/index.php/afinidad/article/view/320832>
- Perez, A. (2018). *EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DEL GRADO DE POLIMERIZACIÓN DEL POLICLORURO DE ALUMINIO COMO COAGULANTE PRIMARIO EN EL TRATAMIENTO DE AGUA*. UNIVERSIDAD DE CARABOBO, Valencia.
- Puertas, F. (1993). *Escorias de alto horno: composición y comportamiento hidráulico*. Recuperado de <https://digital.csic.es/handle/10261/55875>
- Raffino, M. E. (2018, noviembre 14). Estadística inferencial: Concepto, Usos y Ejemplos. Recuperado 15 de mayo de 2019, de <https://concepto.de/estadistica-inferencial/>
- Rajasekar, A., Arunachalam, K., Kottaisamy, M., & Saraswathy, V. (2018). Durability characteristics of Ultra High Strength Concrete with treated sugarcane bagasse ash. *Construction and Building Materials*, *171*, 350-356. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.140>

Ramirez, G. (2003). *Manejo de lodos producidos en la planta de tratamiento de agua potable, planta 2, del municipio de Cartago, Valle* (Universidad nacional de Colombia).

Recuperado de <https://core.ac.uk/download/pdf/11051579.pdf>

Restrepo, J. C., Restrepo, O. J., & Tóbon, J. I. (2014). REDUCCIÓN DE CO₂ EN LA INDUSTRIA CEMENTERA POR MEDIO DE PROCESOS DE SÍNTESIS QUÍMICA. *Revista Colombiana de Materiales*, 0(5), 54-60.

Rojas, M. claudia, Garcia, M. E., Vargas, G., & Velilla, M. A. *Infraccion ambiental - por descarga de lodos a cuerpos de agua superficial.* , (Tribunal administrativo del atlantico 24 de noviembre de 2010).

Sanjuan, M., Estevez, E., Argiz, C., & del Barrio, D. (2018). Effect of curing time on granulated blast-furnace slag cement mortars carbonation. *Cement and Concrete Composites*, 90, 257-265. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.04.006>

SEINTBA S.C. (2010). *MANIFESTACION DE IMPACTO AMBIENTAL RESIDUOS PELIGROSOS* (p. 117). SERVICIO DE ECOLOGÍA INTEGRAL DEL BAJÍO S.A. DE C.V.

Shuqiang, xu, Qinglin, M., & Julin, W. (2018). Combined effect of isobutyltriethoxysilane and silica fume on the performance of natural hydraulic lime-based mortars. *Construction and Building Materials*, 162, 181-191. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.150>

Sollutia.com. (s. f.-a). Cenizas procedentes de la incineración de biomasa | CEDEX. Recuperado 3 de abril de 2019, de <http://www.cedexmateriales.es/catalogo-de-residuos/23/diciembre-2014/>

Sollutia.com. (s. f.-b). Humo de sílice | CEDEX. Recuperado 3 de abril de 2019, de <http://www.cedexmateriales.es/catalogo-de-residuos/29/humo-de-silice/>

- Tobón, J. I., & Gómez, R. K. (2008). DESEMPEÑO DEL CEMENTO PÓRTLAND ADICIONADO CON CALIZAS DE DIFERENTES GRADOS DE PUREZA. *DYNA*, 75(156), 177-184.
- Torres, R., & Nicolas, J. (2018). Propuesta metodológica para tratamiento de lodos provenientes de plantas de potabilización en la sabana de Bogotá (estudio de caso Madrid, Cundinamarca). *instname:Universidad Libre*. Recuperado de <http://repository.unilibre.edu.co/handle/10901/11289>
- Triple A S.A. E.S.P. (s. f.). *Etapas de la potabilización del Agua*. (<http://www.aaa.com.co/acueducto/potabilizacion/>).
- Vargas, J. W. P., Buzón, J. A., Vergara, D. A., & Molina, E. (2011). Reducción de los Residuos Sólidos Orgánicos en Colombia por medio del Compostaje Líquido. *Ingeniare*, (11), 37-44. <https://doi.org/10.18041/1909-2458/ingeniare.11.643>
- Vigneshwari, M., Arunachalam, K., & Angayarkanni, A. (2018). Replacement of silica fume with thermally treated rice husk ash in Reactive Powder Concrete. *Journal of Cleaner Production*, 188, 264-277. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.008>
- Vouk, D., Serdar, M., Nakić, D., & Anić-Vučinić, A. (2016). *Use of sludge generated at WWTP in the production of cement mortar and concrete*. <https://doi.org/10.14256/JCE.1374.2015>
- Walpole, R. E., Myers, R. H., & Myers, S. L. (2012). *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias* (Novena edición). Mexico: PEARSON EDUCACION.
- Wons, W., Rzepa, K., Reben, M., Murzyn, P., Sitarz, M., & Olejniczak, Z. (2018). Effect of thermal processing on the structural characteristics of fly ashes. *Journal of Molecular Structure*, 1165, 299-304. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2018.04.008>

Yue, Y., Wang, J., & Bai, Y. (2018). Tracing the status of silica fume in cementitious materials with Raman microscope. *Construction and Building Materials*, *159*, 610-616.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.015>

Zhen, C., & Chi, S. (2017). Comparative studies on the effects of sewage sludge ash and fly ash on cement hydration and properties of cement mortars. *Construction and Building Materials*, *154*, 791-803. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.003>

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.003>

Zhen, C., Jiang, S. L., & Chi, S. (2018). Combined use of sewage sludge ash and recycled glass cullet for the production of concrete blocks. *Journal of Cleaner Production*, *171*, 1447-

1459. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.140>

Anexos

Resultados del ensayo XRF

Tabla 14
Resultados XRF para lodo calcinado.

| LODO CALCINADO A 800°C | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------------|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------|---------|
| DESCRIPCION | Na2O | MgO | Al2O3 | SiO2 | P2O5 | SO3 | K2O | CaO | TiO2 | MnO | Fe2O3 | SrO | BaO | Total x | |
| # CORRIDA | MUESTRA | Contenido | Contenido | Contenido | Contenido | Contenido | Contenido | Contenido | Contenido | Contenido | Contenido | Contenido | Contenido | muestra | |
| 1 | LC-1 | 0,7580% | 1,4640% | 22,2120% | 61,0890% | 0,2120% | 0,1440% | 2,1200% | 1,2600% | 0,8830% | 0,1310% | 9,6110% | 0,0282% | 0,0890% | 100,00% |
| 2 | LC-1 | 0,7640% | 1,4670% | 22,2180% | 61,1230% | 0,2120% | 0,1430% | 2,1090% | 1,2590% | 0,8780% | 0,1307% | 9,5940% | 0,0282% | 0,0743% | 100,00% |
| 3 | LC-1 | 0,7730% | 1,4640% | 22,2980% | 61,1460% | 0,2120% | 0,1400% | 2,0910% | 1,2370% | 0,8660% | 0,1302% | 9,5320% | 0,0282% | 0,0820% | 100,00% |
| 4 | LC-1 | 0,7270% | 1,4500% | 22,1480% | 61,2070% | 0,2130% | 0,1420% | 2,1100% | 1,2540% | 0,8710% | 0,1297% | 9,6370% | 0,0285% | 0,0827% | 100,00% |
| 5 | LC-1 | 0,7550% | 1,4550% | 22,1730% | 61,1970% | 0,2130% | 0,1420% | 2,1040% | 1,2530% | 0,8680% | 0,1290% | 9,5970% | 0,0286% | 0,0863% | 100,00% |
| 6 | LC-1 | 0,7580% | 1,4540% | 22,2060% | 61,1780% | 0,2150% | 0,1430% | 2,1040% | 1,2420% | 0,8720% | 0,1289% | 9,5840% | 0,0282% | 0,0864% | 100,00% |
| 7 | LC-1 | 0,7650% | 1,4550% | 22,2070% | 61,1680% | 0,2110% | 0,1440% | 2,1120% | 1,2470% | 0,8710% | 0,1292% | 9,5900% | 0,0283% | 0,0734% | 100,00% |
| 8 | LC-1 | 0,7610% | 1,4610% | 22,1980% | 61,1740% | 0,2100% | 0,1440% | 2,1080% | 1,2480% | 0,8670% | 0,1303% | 9,5900% | 0,0282% | 0,0792% | 100,00% |
| 9 | LC-1 | 0,7500% | 1,4590% | 22,1940% | 61,1690% | 0,2140% | 0,1460% | 2,1090% | 1,2480% | 0,8670% | 0,1292% | 9,6060% | 0,0283% | 0,0798% | 100,00% |
| 10 | LC-1 | 0,7470% | 1,4510% | 22,1360% | 61,1730% | 0,2120% | 0,1470% | 2,1100% | 1,2530% | 0,8710% | 0,1307% | 9,6530% | 0,0284% | 0,0878% | 100,00% |
| 11 | LC-1 | 0,7660% | 1,4610% | 22,1900% | 61,1850% | 0,2120% | 0,1460% | 2,1010% | 1,2420% | 0,8660% | 0,1305% | 9,5920% | 0,0283% | 0,0794% | 100,00% |
| 12 | LC-1 | 0,7730% | 1,4650% | 22,1860% | 61,1590% | 0,2130% | 0,1440% | 2,0980% | 1,2530% | 0,8740% | 0,1305% | 9,6000% | 0,0284% | 0,0777% | 100,00% |
| 13 | LC-1 | 0,7510% | 1,4540% | 22,1920% | 61,1690% | 0,2150% | 0,1460% | 2,1140% | 1,2510% | 0,8700% | 0,1303% | 9,6000% | 0,0282% | 0,0790% | 100,00% |
| 14 | LC-1 | 0,7480% | 1,4610% | 22,1640% | 61,1810% | 0,2120% | 0,1450% | 2,1100% | 1,2500% | 0,8740% | 0,1317% | 9,6200% | 0,0285% | 0,0751% | 100,00% |
| 15 | LC-1 | 0,7590% | 1,4530% | 22,1250% | 61,1910% | 0,2120% | 0,1450% | 2,1130% | 1,2520% | 0,8730% | 0,1325% | 9,6330% | 0,0284% | 0,0820% | 100,00% |
| 16 | LC-2 | 0,7410% | 1,4410% | 22,1370% | 61,2160% | 0,2130% | 0,1430% | 2,1120% | 1,2590% | 0,8670% | 0,1306% | 9,6330% | 0,0284% | 0,0798% | 100,00% |
| 17 | LC-2 | 0,7540% | 1,4410% | 22,1400% | 61,2250% | 0,2120% | 0,1460% | 2,1070% | 1,2560% | 0,8680% | 0,1303% | 9,6180% | 0,0283% | 0,0739% | 100,00% |
| 18 | LC-2 | 0,7500% | 1,4470% | 22,1540% | 61,2040% | 0,2110% | 0,1460% | 2,1130% | 1,2570% | 0,8750% | 0,1311% | 9,6190% | 0,0286% | 0,0630% | 100,00% |
| 19 | LC-2 | 0,7340% | 1,4460% | 22,1890% | 61,2030% | 0,2110% | 0,1430% | 2,1120% | 1,2480% | 0,8670% | 0,1302% | 9,6070% | 0,0283% | 0,0795% | 100,00% |
| 20 | LC-2 | 0,7580% | 1,4440% | 22,1440% | 61,2470% | 0,2130% | 0,1430% | 2,1100% | 1,2570% | 0,8770% | 0,1293% | 9,6070% | 0,0284% | 0,0434% | 100,00% |
| 21 | LC-2 | 0,7510% | 1,4480% | 22,1850% | 61,2530% | 0,2090% | 0,1450% | 2,1080% | 1,2570% | 0,8770% | 0,1316% | 9,5810% | 0,0282% | 0,0257% | 100,00% |
| 22 | LC-2 | 0,7390% | 1,4560% | 22,1680% | 61,2080% | 0,2130% | 0,1440% | 2,1220% | 1,2510% | 0,8680% | 0,1313% | 9,5890% | 0,0283% | 0,0820% | 100,00% |
| 23 | LC-2 | 0,7560% | 1,4590% | 22,1380% | 61,2210% | 0,2140% | 0,1460% | 2,1160% | 1,2560% | 0,8700% | 0,1309% | 9,5850% | 0,0280% | 0,0803% | 100,00% |
| 24 | LC-2 | 0,7580% | 1,4510% | 22,1650% | 61,2610% | 0,2130% | 0,1460% | 2,1080% | 1,2360% | 0,8710% | 0,1297% | 9,5510% | 0,0277% | 0,0849% | 100,00% |
| 25 | LC-2 | 0,7630% | 1,4520% | 22,1640% | 61,2340% | 0,2110% | 0,1470% | 2,1070% | 1,2580% | 0,8650% | 0,1281% | 9,5590% | 0,0279% | 0,0841% | 100,00% |
| 26 | LC-2 | 0,7700% | 1,4620% | 22,1130% | 61,2530% | 0,2140% | 0,1420% | 2,1190% | 1,2490% | 0,8700% | 0,1306% | 9,5690% | 0,0279% | 0,0813% | 100,00% |
| 27 | LC-2 | 0,7670% | 1,4580% | 22,1140% | 61,2480% | 0,2170% | 0,1460% | 2,1170% | 1,2520% | 0,8720% | 0,1282% | 9,5660% | 0,0278% | 0,0856% | 100,00% |
| 28 | LC-2 | 0,7590% | 1,4490% | 22,1150% | 61,2910% | 0,2140% | 0,1450% | 2,1030% | 1,2510% | 0,8690% | 0,1315% | 9,5740% | 0,0281% | 0,0709% | 100,00% |
| 29 | LC-2 | 0,7330% | 1,4450% | 22,0660% | 61,2510% | 0,2130% | 0,1460% | 2,1130% | 1,2550% | 0,8680% | 0,1298% | 9,6650% | 0,0281% | 0,0866% | 100,00% |
| 30 | LC-2 | 0,7790% | 1,4530% | 22,0710% | 61,1870% | 0,2160% | 0,1450% | 2,1230% | 1,2590% | 0,8690% | 0,1327% | 9,6500% | 0,0281% | 0,0853% | 100,00% |
| MEDIANA | | 0,758% | 1,454% | 22,165% | 61,200% | 0,213% | 0,145% | 2,110% | 1,253% | 0,870% | 0,130% | 9,599% | 0,028% | 0,080% | |
| DESVIACION ESTANDAR | | 0,012% | 0,007% | 0,047% | 0,044% | 0,002% | 0,002% | 0,007% | 0,006% | 0,004% | 0,001% | 0,031% | 0,000% | 0,013% | |

Nota: Resultados obtenidos para el ensayo de fluorescencia de rayos – X para el lodo calcinado a 800 °C, adaptado de Excel

Tabla 15
Resultados XRF para lodo sin calcinar.

| LODO SIN CALCINAR | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------|
| DESCRIPCION | | Na2O | MgO | Al2O3 | SiO2 | P2O5 | SO3 | K2O | CaO | TiO2 | MnO | Fe2O3 | SrO | BaO | Total x |
| # CORRIDA | MUESTRA | Contenido | Contenido | Contenido | Contenido | Contenido | Contenido | Contenido | Contenido | Contenido | Contenido | Contenido | Contenido | Contenido | muestra |
| 1 | L-1 | 0,6730% | 1,2830% | 18,9850% | 63,0530% | 0,2210% | 0,1540% | 2,2890% | 1,3680% | 0,9570% | 0,1462% | 10,7630% | 0,0312% | 0,0782% | 100,00% |
| 2 | L-1 | 0,6810% | 1,2830% | 19,0080% | 63,0430% | 0,2170% | 0,1520% | 2,2850% | 1,3800% | 0,9600% | 0,1459% | 10,7210% | 0,0316% | 0,0940% | 100,00% |
| 3 | L-1 | 0,6660% | 1,2790% | 19,0180% | 63,0100% | 0,2160% | 0,1500% | 2,2890% | 1,3740% | 0,9670% | 0,1469% | 10,7590% | 0,0314% | 0,0931% | 100,00% |
| 4 | L-1 | 0,6690% | 1,2840% | 19,0670% | 63,0480% | 0,2140% | 0,1520% | 2,2800% | 1,3770% | 0,9620% | 0,1457% | 10,7140% | 0,0313% | 0,0557% | 100,00% |
| 5 | L-1 | 0,6700% | 1,2860% | 19,1220% | 63,0030% | 0,2170% | 0,1530% | 2,2800% | 1,3690% | 0,9600% | 0,1442% | 10,6700% | 0,0313% | 0,0933% | 100,00% |
| 6 | L-1 | 0,6860% | 1,2930% | 19,0840% | 62,9920% | 0,2150% | 0,1540% | 2,2830% | 1,3800% | 0,9620% | 0,1445% | 10,6870% | 0,0314% | 0,0886% | 100,00% |
| 7 | L-1 | 0,6780% | 1,2810% | 19,0980% | 63,0690% | 0,2170% | 0,1540% | 2,2960% | 1,3750% | 0,9690% | 0,1439% | 10,6230% | 0,0312% | 0,0647% | 100,00% |
| 8 | L-1 | 0,6690% | 1,2790% | 19,1040% | 62,9790% | 0,2160% | 0,1510% | 2,2840% | 1,3760% | 0,9670% | 0,1450% | 10,7500% | 0,0312% | 0,0498% | 100,00% |
| 9 | L-1 | 0,6930% | 1,2770% | 19,0630% | 62,9130% | 0,2170% | 0,1540% | 2,2910% | 1,3870% | 0,9650% | 0,1470% | 10,7770% | 0,0315% | 0,0853% | 100,00% |
| 10 | L-1 | 0,6770% | 1,2800% | 19,1040% | 63,0000% | 0,2150% | 0,1540% | 2,2840% | 1,3720% | 0,9630% | 0,1467% | 10,7210% | 0,0314% | 0,0522% | 100,00% |
| 11 | L-1 | 0,6740% | 1,2790% | 19,0350% | 62,9850% | 0,2150% | 0,1540% | 2,2930% | 1,3820% | 0,9610% | 0,1459% | 10,7670% | 0,0313% | 0,0759% | 100,00% |
| 12 | L-1 | 0,6500% | 1,2650% | 19,0610% | 62,9950% | 0,2180% | 0,1520% | 2,2980% | 1,3810% | 0,9690% | 0,1446% | 10,7480% | 0,0313% | 0,0880% | 100,00% |
| 13 | L-1 | 0,6760% | 1,2740% | 19,0590% | 62,9570% | 0,2200% | 0,1510% | 2,2880% | 1,3820% | 0,9620% | 0,1462% | 10,7780% | 0,0316% | 0,0743% | 100,00% |
| 14 | L-1 | 0,6630% | 1,2810% | 19,0720% | 62,9350% | 0,2160% | 0,1530% | 2,2940% | 1,3890% | 0,9620% | 0,1456% | 10,7770% | 0,0316% | 0,0806% | 100,00% |
| 15 | L-1 | 0,6740% | 1,2850% | 19,0180% | 62,9000% | 0,2190% | 0,1550% | 2,3010% | 1,3850% | 0,9650% | 0,1492% | 10,8260% | 0,0318% | 0,0914% | 100,00% |
| 16 | L-2 | 0,6770% | 1,2710% | 18,7180% | 63,2090% | 0,2170% | 0,1530% | 2,3000% | 1,3810% | 0,9570% | 0,1473% | 10,8520% | 0,0316% | 0,0862% | 100,00% |
| 17 | L-2 | 0,6560% | 1,2720% | 18,7080% | 63,2330% | 0,2170% | 0,1530% | 2,3030% | 1,3820% | 0,9650% | 0,1473% | 10,8510% | 0,0318% | 0,0803% | 100,00% |
| 18 | L-2 | 0,6540% | 1,2610% | 18,7480% | 63,2430% | 0,2220% | 0,1530% | 2,2970% | 1,3860% | 0,9700% | 0,1479% | 10,8170% | 0,0318% | 0,0706% | 100,00% |
| 19 | L-2 | 0,6550% | 1,2700% | 18,7390% | 63,2150% | 0,2180% | 0,1510% | 2,3000% | 1,3850% | 0,9660% | 0,1477% | 10,8350% | 0,0316% | 0,0895% | 100,00% |
| 20 | L-2 | 0,6890% | 1,2730% | 18,7200% | 63,1880% | 0,2170% | 0,1510% | 2,3060% | 1,3840% | 0,9660% | 0,1489% | 10,8420% | 0,0320% | 0,0835% | 100,00% |
| 21 | L-2 | 0,6830% | 1,2750% | 18,7390% | 63,1750% | 0,2200% | 0,1530% | 2,2990% | 1,3770% | 0,9640% | 0,1480% | 10,8500% | 0,0317% | 0,0849% | 100,00% |
| 22 | L-2 | 0,6750% | 1,2660% | 18,7890% | 63,5930% | 0,2200% | 0,1520% | 2,2290% | 1,3870% | 0,7770% | 0,1482% | 10,7780% | 0,0315% | -0,0469% | 100,00% |
| 23 | L-2 | 0,6850% | 1,2660% | 18,7060% | 63,2150% | 0,2150% | 0,1530% | 2,2940% | 1,3800% | 0,9690% | 0,1481% | 10,8570% | 0,0320% | 0,0802% | 100,00% |
| 24 | L-2 | 0,6600% | 1,2710% | 18,7100% | 63,2220% | 0,2170% | 0,1520% | 2,3020% | 1,3830% | 0,9670% | 0,1478% | 10,8490% | 0,0317% | 0,0875% | 100,00% |
| 25 | L-2 | 0,6700% | 1,2660% | 18,7580% | 63,2210% | 0,2150% | 0,1530% | 2,2870% | 1,3780% | 0,9670% | 0,1481% | 10,8200% | 0,0318% | 0,0845% | 100,00% |
| 26 | L-2 | 0,6690% | 1,2760% | 18,7090% | 63,2820% | 0,2210% | 0,1520% | 2,3000% | 1,3790% | 0,9630% | 0,1471% | 10,7950% | 0,0316% | 0,0746% | 100,00% |
| 27 | L-2 | 0,6800% | 1,2630% | 18,7410% | 63,2740% | 0,2160% | 0,1510% | 2,2980% | 1,3740% | 0,9600% | 0,1452% | 10,7830% | 0,0314% | 0,0849% | 100,00% |
| 28 | L-2 | 0,6690% | 1,2700% | 18,7420% | 63,2060% | 0,2170% | 0,1500% | 2,3020% | 1,3820% | 0,9620% | 0,1485% | 10,8310% | 0,0316% | 0,0894% | 100,00% |
| 29 | L-2 | 0,6750% | 1,2680% | 18,7250% | 63,2410% | 0,2160% | 0,1510% | 2,2980% | 1,3820% | 0,9660% | 0,1486% | 10,8180% | 0,0315% | 0,0812% | 100,00% |
| 30 | L-2 | 0,6770% | 1,2670% | 18,7320% | 63,2410% | 0,2150% | 0,1510% | 2,3060% | 1,3810% | 0,9700% | 0,1454% | 10,8220% | 0,0316% | 0,0627% | 100,00% |
| MEDIANA | | 0,674% | 1,275% | 18,887% | 63,122% | 0,217% | 0,153% | 2,295% | 1,381% | 0,965% | 0,147% | 10,781% | 0,032% | 0,082% | |
| DESVIACION ESTANDAR | | 0,010% | 0,008% | 0,170% | 0,152% | 0,002% | 0,001% | 0,014% | 0,005% | 0,034% | 0,001% | 0,060% | 0,000% | 0,026% | |

Nota: Resultados obtenidos para el ensayo de fluorescencia de rayos – X para el lodo sin calcinar, adaptado de Excel

Tabla 16
Resumen de contraste de hipótesis LCC para Al_2O_3

| | Hipótesis nula | Prueba | Sig | Decisión |
|---|--|---|-------|---------------------------|
| 1 | La distribución de OXIDO DE ALUMINIO es la misma entre las categorías de LCC | Prueba de Kruskal Wallis para muestras independientes | 0.000 | Rechace la hipótesis nula |

Nota: Resultado prueba de Kruskal Wallis en el Al_2O_3 , adaptado de SPSS.

Tabla 17
Resumen de contraste de hipótesis LCC para Fe_2O_3

| | Hipótesis nula | Prueba | Sig | Decisión |
|---|--|---|-------|----------------------------|
| 1 | La distribución de OXIDO DE HIERRO es la misma entre las categorías de LCC | Prueba de Kruskal Wallis para muestras independientes | 0.430 | Conserve la hipótesis nula |

Nota: Resultado prueba de Kruskal Wallis en el Fe_2O_3 , adaptado de SPSS.

Tabla 18
Resumen de contraste de hipótesis LCC para MgO

| | Hipótesis nula | Prueba | Sig | Decisión |
|---|--|---|-------|---------------------------|
| 1 | La distribución de OXIDO DE MAGENSIO es la misma entre las categorías de LCC | Prueba de Kruskal Wallis para muestras independientes | 0.002 | Rechace la hipótesis nula |

Nota: Resultado prueba de Kruskal Wallis en el MgO , adaptado de SPSS.

Tabla 19
Resumen de contraste de hipótesis LCC para CaO

| | Hipótesis nula | Prueba | Sig | Decisión |
|---|--|---|------|----------------------------|
| 1 | La distribución de OXIDO DE CALCIO es la misma entre las categorías de LCC | Prueba de Kruskal Wallis para muestras independientes | 0.96 | Conserve la hipótesis nula |

Nota: Resultado prueba de Kruskal Wallis en el CaO, adaptado de SPSS.

Tabla 20
Resumen de contraste de hipótesis LCC para SO₃

| | Hipótesis nula | Prueba | Sig | Decisión |
|---|--|---|-------|----------------------------|
| 1 | La distribución de OXIDO DE AZUFRE es la misma entre las categorías de LCC | Prueba de Kruskal Wallis para muestras independientes | 0.236 | Conserve la hipótesis nula |

Nota: Resultado prueba de Kruskal Wallis en el SO₃, adaptado de SPSS.

Tabla 21
Resumen de contraste de hipótesis LSC para SiO₂

| | Hipótesis nula | Prueba | Sig | Decisión |
|---|---|---|-------|---------------------------|
| 1 | La distribución de OXIDO DE SILICIO es la misma entre las categorías de LSC | Prueba de Kruskal Wallis para muestras independientes | 0.000 | Rechace la hipótesis nula |

Nota: Resultado prueba de Kruskal Wallis en el SiO₂, adaptado de SPSS.

Tabla 22
Resumen de contraste de hipótesis LSC para Al_2O_3

| | Hipótesis nula | Prueba | Sig | Decisión |
|---|--|---|-------|---------------------------|
| 1 | La distribución de OXIDO DE ALUMINIO es la misma entre las categorías de LSC | Prueba de Kruskal Wallis para muestras independientes | 0.000 | Rechace la hipótesis nula |

Nota: Resultado prueba de Kruskal Wallis en el Al_2O_3 , adaptado de SPSS.

Tabla 23
Resumen de contraste de hipótesis LSC para Fe_2O_3

| | Hipótesis nula | Prueba | Sig | Decisión |
|---|--|---|-------|---------------------------|
| 1 | La distribución de OXIDO DE HIERRO es la misma entre las categorías de LSC | Prueba de Kruskal Wallis para muestras independientes | 0.000 | Rechace la hipótesis nula |

Nota: Resultado prueba de Kruskal Wallis en el Fe_2O_3 , adaptado de SPSS.

Tabla 24
Resumen de contraste de hipótesis LSC para MgO

| | Hipótesis nula | Prueba | Sig | Decisión |
|---|--|---|-------|---------------------------|
| 1 | La distribución de OXIDO DE MAGNESIO es la misma entre las categorías de LSC | Prueba de Kruskal Wallis para muestras independientes | 0.000 | Rechace la hipótesis nula |

Nota: Resultado prueba de Kruskal Wallis en el MgO , adaptado de SPSS.

Tabla 25
Resumen de contraste de hipótesis LSC para CaO

| | Hipótesis nula | Prueba | Sig | Decisión |
|---|--|---|-------|----------------------------|
| 1 | La distribución de OXIDO DE CALCIO es la misma entre las categorías de LSC | Prueba de Kruskal Wallis para muestras independientes | 0.158 | Conserve la hipótesis nula |

Nota: Resultado prueba de Kruskal Wallis en el CaO, adaptado de SPSS.

Tabla 26
Resumen de contraste de hipótesis LSC para SO₃

| | Hipótesis nula | Prueba | Sig | Decisión |
|---|--|---|-------|---------------------------|
| 1 | La distribución de OXIDO DE AZUFRE es la misma entre las categorías de LSC | Prueba de Kruskal Wallis para muestras independientes | 0.048 | Rechace la hipótesis nula |

Nota: Resultado prueba de Kruskal Wallis en el SO₃, adaptado de SPSS.