

Análisis comparativo de la concentración de óxidos presentes en el cemento portland y lodos de plantas de tratamiento de agua potable

Y. Avila Pereira^{*}, S. Restrepo Velasquez^a, J. Jiménez Valencia^b,
M. Castillo Ramírez^c, A. Parody Muñoz^d

^{abc}Universidad de la Costa, ^dUniversidad Autónoma del Caribe

Comparative analysis of the concentration of oxides present in portland cement and sludge from drinking water treatment plants

Anàlisi comparatiu de la concentració d'òxids presents en el ciment portland i llots de plantes de tractament d'aigua potable

RECEIVED: 15 MARCH. REVISED: 20 JUNE 2016. ACCEPTED: 5 JULY 2016

SUMMARY

Oxides concentrations in two types of sludge that came from treatment plants of potable water (PTAP) from Colombian Caribbean region were determined, and were compared with concentrations of these oxides in Portland cement type II, in order to decide how feasible is its use in the construction field.

Research development was made in three stages: 1. Sampling and drying of sludge. 2. Analysis by X-rays fluorescence (XRF), to both types of muds and cement. 3. Statistical analysis of results obtained through a nonparametric test for median comparison.

We can conclude in a statistic way exists an important difference in concentrations of CaO, SiO₂, Fe₂O₃, MgO and Al₂O₃ of sludges and cement Portland type, however sludge B meets the requirements of the NTC 321 standard "Composición química del cemento Portland (Chemical Composition of Portland Cement)" in concentrations of Al₂O₃, Fe₂O₃ and MgO except in SiO₂, in other hand sludge A only meets with percentages of SiO₂ and MgO.

Keywords: Composition; FRX; muds; exploitation; mortar; cement.

RESUMEN

Se determinaron las concentraciones de óxidos en dos tipos de lodos provenientes de plantas de tratamiento de agua potable (PTAP) de la región caribe colombiana, y se compararon con las concentraciones de los mismos en el cemento portland tipo II, esto

con el fin de determinar qué tan factible es su uso en el ámbito de la construcción.

El desarrollo de la investigación se llevó a cabo en tres etapas: 1. Toma de muestras y secado de lodos. 2. Análisis por fluorescencia de rayos X (FRX), a las muestras de los dos tipos de lodos y el cemento. 3. Análisis estadístico de los resultados obtenidos, mediante una prueba no paramétrica para la comparación de medianas.

Se concluye que estadísticamente existe una diferencia significativa en las concentraciones de CaO, SiO₂, Fe₂O₃, MgO y Al₂O₃ de los lodos y el cemento tipo portland, no obstante, el lodo B cumple con lo exigido por la norma NTC 321 "Composición química del cemento portland" en cuanto a la concentración de Al₂O₃, Fe₂O₃ y MgO excepto en el SiO₂, mientras que el lodo A solo cumple con el porcentaje de SiO₂ y MgO.

Palabras clave: Composición; FRX; lodos; aprovechamiento; morteros; cemento.

RESUM

Es van determinar les concentracions d'òxids a dos tipus de llots provinents de plantes de tractament d'aigua potable (PTAP) de la regió caribenya colombiana, i van ser comprats amb les concentracions dels

*Autor para la correspondencia:
*yavila3@cuc.edu.co

mateixos en el ciment pòrtland tipus II, això amb finalitat de determinar com és de factible el seu us a l'àmbit de la construcció.

El desenvolupament de la investigació es va dur a terme en tres etapes: 1. Presa de mostres i assecat de llots. 2. Anàlisi per fluorescència de rajos X (FRA), a les mostres dels tipus de llots i el ciment. 3. Anàlisi estadístic dels resultats obtinguts, mitjançant una prova no paramètrica per a la comparació de mitjanes.

Es conclou que estadísticament existeix una diferència significativa en las concentracions de CaO, SiO₂, Fe₂O₃, MgO i Al₂O₃ dels llots i el ciment tipus pòrtland, no obstant, el llot B compleix amb el que exigeix la norma NTC 321 "Composició química del ciment pòrtland" pel que fa a la concentració de Al₂O₃, Fe₂O₃ i MgO excepte en el SiO₂, mentre que el llot A només compleix amb el percentatge de SiO₂ i MgO.

Paraules clau: Composició; FRX; llots; aprofitament; morters; ciment.

INTRODUCCIÓN

Según la *Organización de las Naciones Unidas* -ONU- aproximadamente 6.680.020 habitantes tienen acceso a agua potable, captándose alrededor de 3,940.700.000.000 m³/año para consumo humano. Para minimizar los riesgos asociados a la salud¹, estos, pueden ser sometidos a diferentes tipos de tratamiento, tales como: electrocoagulación², osmosis inversa³, o de tipo convencional donde se utilizan diferentes químicos: coagulantes (sales de aluminio o hierro), floculantes (poliacrilamidas catiónicas o aniónicas) y desinfectantes (ozono o hipoclorito de sodio), dejando un residuo o lodo, que corresponde al 0,5-1% del total de agua tratada⁴, produciéndose en la actualidad aproximadamente 19,700.000.000 m³/año de lodos. Hasta finales del siglo pasado, se le daba poca importancia a la disposición final de estos, vertiéndolos en los cauces de agua sin ninguna restricción, dado que no era conocida su carga química, eran considerados como una mezcla de suelo (arcillas, limos y arenas), sin embargo, actualmente el manejo que se le ha dado a este residuo es el almacenamiento en lagunas por períodos de tiempo indefinidos, incineración, espesamiento y deshidratación, pero, debido a que sus propiedades mecánicas incrementan proporcionalmente con las dosis de coagulante utilizado, estas operaciones pueden resultar complejas y, en la mayoría de los casos, lo más efectivo es su disposición en fuentes de agua superficial^{5,6,7}.

Colombia no es ajena a esta problemática, según el *Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico* (RAS, 2000) el manejo de lodos, constituye uno de los aspectos más críticos en la operación de plantas de tratamiento de agua potable (PTAP), en el país, se reportaron en el año 2009, 26.200.000 m³ de lodos en el *Sistema Único de Información de Servicios Públicos (SUI)*, de los cuales, 3.610.000 m³ son provenientes del caribe colombia-

no⁸. Debido a los grandes volúmenes de lodos que se generan en los procesos de potabilización, se ha creado la necesidad de buscar alternativas sostenibles que permitan darle un tratamiento para poder reutilizarlos y reincorporarlos a la cadena productiva.

Actualmente se conocen las características químicas de estos residuos y el impacto ambiental que generan, por ello en muchos países se han llevado a cabo diferentes estudios con el objetivo de disminuir su cantidad o darles un valor agregado; dentro de estas investigaciones se encuentra un trabajo adelantado por Díaz y Muy, en el que se evaluó su aplicación en el sector agrícola como mitigante de la sodicidad de los suelos en México, encontrando que mejoran significativamente el volumen de infiltración de este⁹, a su vez Kyncl, en República Checa, llevó a cabo un estudio en el que se determinó la rentabilidad de la recuperación del coagulante, concluyendo que es posible recuperar hasta un 80% de este, sin embargo, el costo de este proceso es muy elevado¹⁰.

Otro campo de aplicación de este residuo corresponde al sector de la construcción, donde se han desarrollado trabajos tales como la incorporación de lodos térmicamente tratados a morteros de cemento, identificando para ello los constituyentes mineralógicos presentes al llevar los lodos a temperaturas de 105°C, 450°C y 750°C, determinando que la incorporación de estos solo puede ser posible si el lodo ha sido tratado a no menos de 450°C, dándole al mortero una consistencia mayor, un aumento en el tiempo de fraguado y una disminución en cuanto a la resistencia mecánica¹¹, así mismo, Vieira y Margem, en Brasil llevaron a cabo un estudio en el cual se determinaron los cambios microestructurales que adquirirían la arcilla cerámica al incorporarse lodos provenientes de una PTAP que fueron secados a una temperatura de 700°C, llegando a la conclusión de que la inclusión de estos conlleva a un aumento en los defectos microestructurales¹². Por otro lado, Alqam y Jamrah en Jordania estudiaron el posible reemplazo parcial del cemento por lodos de tratamiento de agua potable para la fabricación de adoquines, para ello se usaron relaciones de 10%, 20%, 30%, 40% y 50% de lodocemento, concluyendo que los adoquines fabricados con las relaciones desde el 10% al 40% cumplen con la resistencia a la compresión mínima requerida por la norma BS EN 13748-2:2004 que equivale a 2,8 Mpa¹³, de igual forma, Kaosol en Tailandia realizó un estudio en el cual se evaluó la reducción del costo de bloques de concreto al añadir lodos provenientes de la potabilización de agua, usando una proporción de 10% y 20% de lodos en la mezcla, llegando a la conclusión que es posible reducir el costo de producción de un bloque de concreto entre 0,018 dólares y 0,029 dólares respectivamente¹⁴, finalmente en Colombia en la Universidad del Valle y la Universidad Tecnológica de Pereira, se examinó cual componente de la producción de ladrillos podría ser reemplazado total o parcialmente por el lodo, encontrando como componente similar la arena, concluyendo que la arena solo puede ser reemplazada en un 10% por lodo para la elaboración de ladrillos cerámicos no estructurales, ya que un valor

mayor a este, podría afectar la resistencia a la compresión y la absorción de agua¹⁵.

El objetivo del presente trabajo es realizar un análisis comparativo de las concentraciones de los óxidos presentes en los lodos de dos PTAP, ubicadas en el caribe colombiano y el cemento portland, teniendo como base la NTC 321¹⁶, para así determinar qué tan factible es su uso en el ámbito de la construcción.

MATERIALES Y MÉTODOS

Primera etapa: Toma de muestra y secado de lodos

Se tomaron muestras de lodos provenientes de dos plantas potabilizadoras de agua, ubicadas en los departamentos del Atlántico y la Guajira localizados en el caribe colombiano, en los meses de febrero-marzo de 2015, correspondiente al periodo seco, esto con el objetivo de minimizar la variabilidad en la caracterización fisicoquímica de los lodos. El lodo A, proviene de una planta que capta agua superficial, mientras que el lodo B, proviene de una planta que capta agua subterránea, por lo cual su calidad y coloración son diferentes (Figura 1). En la Tabla 1, se observan las condiciones de secado bajo exposición solar de las muestras.

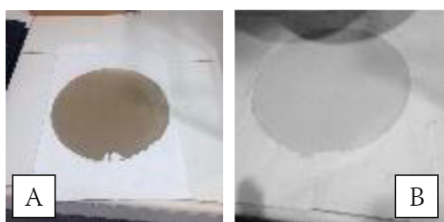


Figura 1. (A: Lodo A; B: Lodo B)

Tabla 1. Condiciones de secado de las muestras de lodos

	Lodo A	Lodo B
Tiempo de secado (hr)	72	120
Temperatura Ambiente (°C)	36	36

Segunda etapa: Análisis por fluorescencia de rayos X

La caracterización química de los lodos de estudio y el cemento, se realizó en base a lo establecido en la ASTM C114 sobre la técnica de fluorescencia de rayos X, FRX [17]. Para ello, se maceraron los lodos, pasando la muestra por el tamiz N°200 (75µm), luego se elaboró una pastilla tomándose 3g de la muestra tamizada, la cual se mezcló con 0,6 g de un agente aglutinante, posteriormente, se colocó la mezcla en un anillo de bronce de 3 cm de diámetro que se ubicó en el interior de un cilindro de compactación (Figura 2A). Por último, se dispuso a ubicar el cilindro de compactación en una prensa, aplicándose durante 30 segundos una carga de 5 toneladas (Figura 2B), finalizado esto, se procedió a montar en la máquina de Fluorescencia de Rayos X-FRX (Figura 2C). Se realizaron 30 corridas para cada una de las muestras.



Figura 2. A: Cilindro de compactación; B: Prensa; C: Máquina FRX)

Tercera etapa: Análisis estadístico de los resultados

Para el análisis estadístico, se seleccionaron los óxidos principales del cemento como el óxido de calcio -CaO-, óxido de silicio -SiO₂-, óxido de aluminio -Al₂O₃-, óxido de hierro -Fe₂O₃- y óxido de magnesio -MgO-, esto debido a que son fundamentales en la formación de diversos minerales como el silicato tricálcico -Alita- responsable de las resistencias iniciales del concreto, el silicato dicálcico -Belita- responsable de las resistencias que adquiere el concreto a medida que pasa el tiempo y del curado de este, el aluminato tricálcico -Celita- este compuesto es el responsable del fraguado siendo una parte fundamental las reacciones químicas en el concreto, y por último el ferroatluminato tetracálcico -Felita- que es el encargado del endurecimiento lento^{16,18}.

Con el fin de comparar las concentraciones de óxidos presentes en el cemento con las de los lodos, se utilizó la prueba no paramétrica de *Kruskal-Wallis* para comparación de las medianas presentes en cada muestra con un 95% de confianza. Esto fue desarrollado empleando el software estadístico Statgraphics XVI.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los porcentajes de fracción seca de los lodos A y B, mostraron diferencias significativas, tal como se observa en la Tabla 2, esto se debe a la calidad del agua captada, que se ve afectada por la época (temporada seca) en la que fueron tomadas las muestras, lo cual puede reducir la cantidad de sólidos suspendidos -SS- para el lodo A, ya que la fuente de captación proviene de agua superficial, en contraste, con el lodo B, cuya fuente de captación es subterránea, y por lo tanto, presenta una concentración mayor de minerales disueltos -MD-, los cuales son removidos en el proceso de potabilización con cal hidratada -Ca(OH)₂-, esto hace que el vertimiento final presente una masa mayor de SS presentes en los lodos.

Tabla 2. Masa inicial de la muestra.

Muestra Lodos	Volumen (mL)	Masa inicial (g)	Masa Final (g)	Fracción seca
A	550	512	23,97	4,68%
B	600	517	170	32,88%

Los datos obtenidos de la técnica de fluorescencia de rayos X, se representan mediante gráficas espectrales y datos composicionales en % peso/peso de los óxidos

presentes en las muestras analizadas, lo primero, se observa en la figura 3, en la cual, se señalan los óxidos analizados en la presente investigación, y con los datos composicionales arrojados, se realizó el análisis de comparación de óxidos.

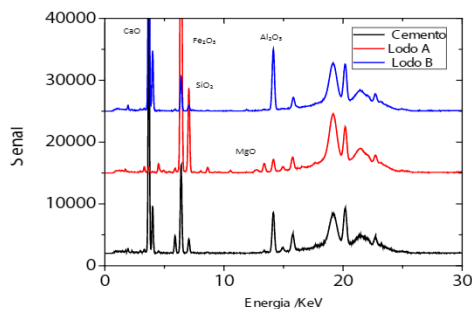


Figura 3. Gráfica espectral de Lodo A, B y Cemento

La comparación de óxidos, se realizó mediante la prueba no paramétrica para la comparación de medianas Kruskal-Wallis, ya que los datos no cumplieron con el supuesto de igualdad de varianza para la comparación de medias (test de Levene's con p -valor $< 0,05$ en todas las comparaciones), esta prueba, viene acompañada del gráfico de cajas sobre la mediana, que actúa como técnica de estimación poblacional, la cual permite representar las diferencias que se encuentran en la prueba, la muesca para la mediana es como el intervalo de confianza para la media, por tanto el gráfico de cajas y de bigotes funciona como el homólogo al test de comparación múltiple que acompaña al ANOVA.

Mediante la prueba estadística, se determinó que existen diferencias significativas en la concentración del óxido de magnesio entre el lodo A, lodo B y cemento (p -valor = 0). En la figura 4, se puede observar mediante el diagrama de caja y bigote que el lodo B, tiene mayor concentración de MgO con respecto al lodo A y Cemento, lo que puede deberse a las altas concentraciones de magnesio en el agua de captación: el agua subterránea disuelve los minerales presentes en las rocas con las cuales tiene contacto. A su vez el tamaño de la muesca, que indica el intervalo de valores en los cuales se encuentra la mediana de la población con una confianza del 95%, se observa que existe poca variabilidad en las concentraciones de MgO para el cemento y lodo B, mientras que para el lodo A, la variabilidad es mayor.

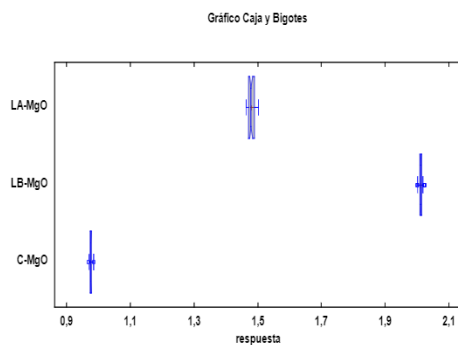


Figura 4. Gráfico de caja y bigotes para el óxido de magnesio

En lo referente a Óxido de Aluminio, se observaron diferencias estadísticamente significativas con p -valor $= 1,4 \times 10^{-11}$, el lodo A presentó una concentración mayor, con respecto al lodo B y el cemento, esto debido al coagulante usado en el proceso de potabilización del agua (Figura 5), el cual, aunque en ambos acueductos corresponde al policloruro de aluminio, por ser el lodo A proveniente de un proceso de potabilización de agua superficial, la dosis aplicada es mayor que en el proceso de potabilización de la planta B. El tamaño de la muesca indica el intervalo de valores en los cuales se encuentra la mediana de la población con una confianza del 95%, se observa que existe poca variabilidad en las concentraciones de Al_2O_3 , para el lodo B y el cemento, mientras que para el lodo A, se muestra una mayor variabilidad.

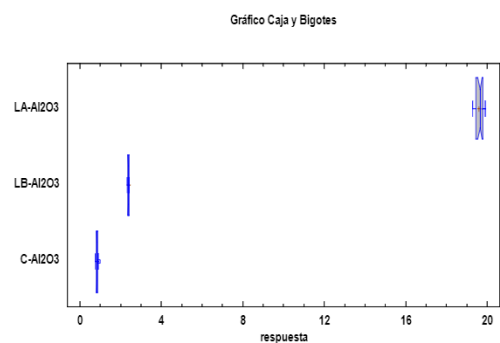


Figura 5. Gráfico de caja y bigotes para el óxido de aluminio.

Al igual que el óxido de aluminio, se observaron diferencias estadísticamente significativas con p -valor $= 1,4 \times 10^{-11}$, observándose mayor concentración de SiO_2 en el lodo A, esta vez seguido del cemento, siendo el lodo B el que presentó menor concentración de este óxido en las muestras analizadas (Figura 6), esto se debe a que el agua de captación del lodo A es agua superficial, la cual, tiene disueltos diferentes tipos de suelos, en su mayoría arcillas las cuales poseen un alto contenido en sílice. El tamaño de la muesca, que indica el intervalo de valores en los cuales se encuentra la mediana de la población con una confianza del 95%, se observa que existe poca variabilidad en las concentraciones de SiO_2 , concluyéndose que la concentración de este óxido es estable.

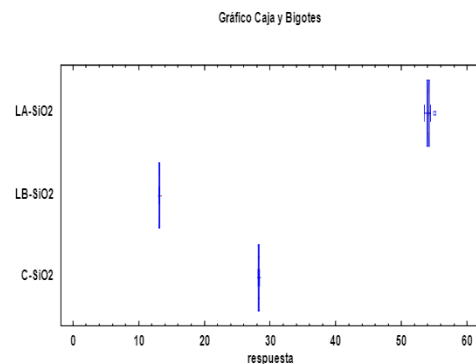


Figura 6. Gráfico de caja y bigotes para el óxido de silicio.

En cuanto al comportamiento del óxido de calcio (Figura 7), se observaron diferencias estadísticamente significativas con $p\text{-valor}=1,3*10^{-11}$, el lodo B presentó mayor concentración, seguido por el cemento que a su vez presenta menor variabilidad de los datos junto al lodo A, este último, además mostró concentraciones muy bajas con respecto a las otras muestras analizadas, la razón de esto, es que la concentración de óxido de calcio en el lodo B, se debe a la cal utilizada para precipitar la dureza presente en el agua subterránea.

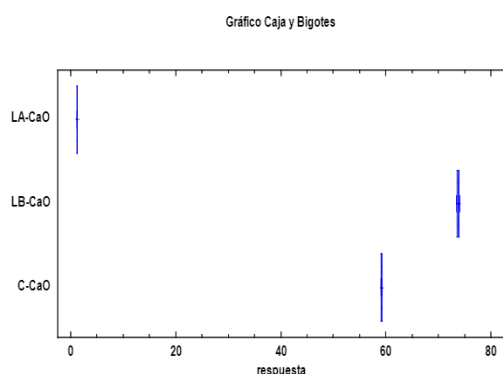


Figura 7. Gráfico de caja y bigotes para el óxido de calcio

El óxido de hierro (Figura 8), al igual que el óxido de calcio y de silicio, se observaron diferencias estadísticamente significativas con $p\text{-valor}=1,3*10^{-11}$, encontrándose un mayor porcentaje en el lodo A, seguido del cemento y por último con menor concentración en el lodo B, lo que puede atribuirse a minerales ferromagnesianos presentes en las arcillas y suelos disueltos en las aguas superficiales.

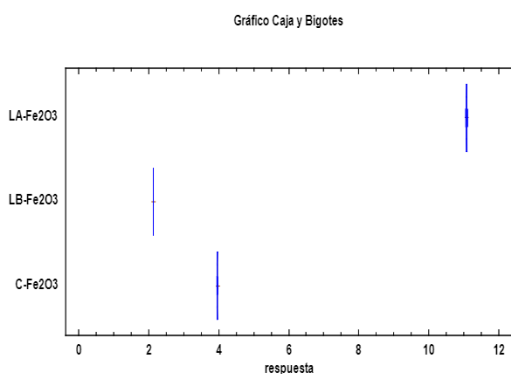


Figura 8. Gráfico de caja y bigotes para el óxido de hierro.

Con el fin de establecer, si estos lodos pueden cumplir con los estándares establecidos en Colombia sobre la composición de cemento, se realizó una comparación con la NTC 321 “Ingeniería Civil y Arquitectura. Cemento Portland. Especificaciones Químicas” (Tabla 3), con el objetivo de evaluar la factibilidad de utilizar este residuo como reemplazo del cemento en materiales de construcción, este análisis, mostró que el lodo A solo cumple con el porcentaje de SiO_2 y MgO , a diferencia del lodo B que cumple en Al_2O_3 , Fe_2O_3 y MgO excepto en el SiO_2 ; en cuanto al cemento se encuentra dentro de los límites permisibles establecidos en la Norma técnica.

Tabla 3. Comparación de óxidos con la norma técnica colombiana (NTC 321).

Óxidos	Lodo A	Lodo B	Cemento	NTC 321
Al_2O_3 (Máx %)	19,6	2,4	0,8	6,0
Fe_2O_3 (Máx %)	11,1	2,1	4,0	6,0
CaO (Máx %)	1,3	73,8	59,2	-
SiO_2 (Min %)	54,1	13,1	28,3	21,0
MgO (Máx %)	1,5	2,0	1,0	7,0

CONCLUSIÓN

A partir del trabajo anterior se puede concluir que: El lodo B presentó una fracción seca correspondiente al 32,88%, mientras el lodo A presentó una fracción seca de 4,68%, lo que indica que a mayor escala puede ser más rentable el uso del lodo B, porque se tiene mayor masa.

Estadísticamente existe una diferencia significativa en las concentraciones de CaO, SiO_2 , Al_2O_3 , MgO , Fe_2O_3 de los lodos y el cemento tipo portland, sin embargo, la composición química representada en el contenido de óxidos, indica que el lodo B podría ser de potencial uso como sustituto de una parte del cemento en la fabricación de diferentes materiales de construcción.

Las altas concentraciones de SiO_2 en el lodo A, podrían hacer este un excelente candidato para reemplazar el agregado fino en la fabricación de morteros y concretos.

Es posible mejorar el lodo B a través de un diseño de mezcla óptima con el lodo A, con el fin de suplir la concentración de SiO_2 en este, la cual está por debajo del mínimo permitido.

REFERENCIAS

- Gabel, K; Tillman, A.-M. Simulating operational alternatives for future cement production. *Elsevier*. **2005**, *13*, 1246-1257.
- Vik, E.A.; Carlson, D.A.; Eikum, A.S.; Gjessing, E.T. Electrocoagulation of potable water. *Water Res*. **1984**, *18*, 1355-1360.
- Brião, V.B.; Magoga, J.; Hemkemeier, M.; Brião, E.B.; Girardelli, L.; Sbeghen, L.; Favaretto, D.P. Reverse osmosis for desalination of water from the Guarani Aquifer System to produce drinking water in southern Brazil. *Desalination*. **2014**, *344*, 402-411.
- Martín, D.A.; Sandoval, Y.L.; Piña, S.M.; Montellano, P.L. Estudio piloto para reducir el volumen de lodos en plantas potabilizadoras. *Morelos*
- Gutiérrez-Rosero, J.A.; Ramírez Fajardo, A.I.; Rivas, R.; Linares, B.; Paredes, D. Tratamiento de lodos generados en el proceso convencional de potabilización de agua. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*. **2014**, *13*, 13-27.

6. O'Kelly, B.C. Landfill disposal of alum water treatment residues: some pertinent geoengineering properties. *J Residuals Science & Technology. J Residuals Sci Tech*, **2010**, 7, 95-113.
7. Wlash, M.E.; Lake, C.B.; Gagnon, G.A. Strategic pathways for the sustainable management of water treatment plant residuals. *J. Environ. Sci. Eng. Technol.* **2008**, 7, 45-52.
8. Ministerio de Desarrollo Economico Ras., Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico, Bogotá D.C., **2000**.
9. Diaz Ibarra, M.A.; Muy Rangel, M.D.; Rubio Carrasco, W.; Armendariz Alcaraz, O. Aplicación de los lodos de procesos de potabilización como mitigantes de la sodicidad en suelos agrícolas. *Ingeniería*, **2010**, 14, 87-97.
10. Kyncl, M. Opportunities for water treatment sludge re-use. *GeoScience Engineering*. **2008**, 54, 11-22.
11. Gonçalves, A.; Esteves, A. M.; Carvalho, M.; Machado, A.; Correira, E. Incorporation of sludges from a water treatment plant in cement mortars. *PRO 40: International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Buildings and Structures*. **2004**, 2, 843-851.
12. Vieira, C.M.; Margem, J.I.; Monteiro, S.N. Microstructural changes of clayey ceramic incorporated with filter sludge water treatment plant. *Matéria* (Rio de Janeiro). **2008**, 13, 275-281.
13. Alqam, M.; Jamrah, A.; Daghlas, H. Utilization of cement incorporated with water treatment sludge. *Jordan Journal of Civil Engineering*. **2011**, 5, 268-277.
14. Kaosol, T. Reuse water treatment sludge for hollow concrete block manufacture. *Energy Res. J.* **2010**, 1, 131-134.
15. Torres, P.; Hernández, D.; Paredes, D. Uso productivo de lodos de plantas de tratamiento de agua potable en la fabricación de ladrillos cerámicos. *Ingeniería de Construcción*. **2012**, 27, 145-154.
16. Ingeniería Civil y Arquitectura. Cemento Portland. Especificaciones Químicas (NTC 321). Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC), Bogotá D.C., **1982**.
17. American Society for Testing and Materials. Standard Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement (C114-15). **2015**.
18. Giraldo, M.A.; Tobón, J.I. Evolución mineralógica del cemento portland durante el proceso de hidratación. *Dyna*. **2006**, 73, 69-81.