

Uso productivo de lodos de plantas de tratamiento de agua potable en la fabricación de ladrillos cerámicos

Productive use of sludge from a drinking water treatment plant for manufacturing ceramic bricks

Patricia Torres^{1*}, Darwin Hernández^{**}, Diego Paredes^{**}

* Universidad del Valle. COLOMBIA

** Universidad Tecnológica de Pereira. COLOMBIA

Fecha de Recepción: 09/07/2012

Fecha de Aceptación: 15/11/2012

PAG 145 - 154

Resumen

Uno de los problemas más importantes en el tratamiento de agua con coagulación química es la generación de lodos, cuya disposición final es predominantemente en cuerpos de agua, afectando su calidad y usos potenciales; el uso productivo de lodos puede ayudar en la recuperación de los recursos naturales y disminuir la contaminación ambiental. En este estudio se evaluó el uso de lodo aluminoso en la fabricación de ladrillos cerámicos; los resultados muestran que es viable incorporar estos lodos en reemplazo parcial de uno de los materiales constitutivos del ladrillo, en este caso la arena en un porcentaje del 10%; sin embargo, para evitar comprometer la resistencia a la compresión debe optimizarse la deshidratación previa del lodo para aumentar el potencial de aprovechamiento. El ladrillo obtenido cumple características adecuadas para uso no estructural.

Palabras Clave: Absorción de agua, deshidratación de lodos, ladrillos cerámicos, lodos aluminosos, resistencia a la compresión.

Abstract

One of the most important problems for water treatment systems based on chemical coagulation process is the sludge generation, whose final disposition is made predominantly onto water, affecting their quality and potential uses. The productive use of this sludges represents a way to relieve some of the problems of solid waste management that helps in the recovery of natural resources and reduces the environmental pollution. This study allowed the evaluation of the use of aluminous sludge for the manufacture of ceramic bricks. The results show that it is feasible to use these sludges in partial replacement of one of the constituent materials of brick, in this case the sand in percentages above 10%; however, to avoid compromising the compression resistance it should be optimized the previous sludge dewatering to increase the potential waste-to-energy scheme. The brick obtained has appropriate characteristics for non-structural use.

Keywords: Aluminous sludge, ceramic bricks, compression resistance, dewatering sludge, water absorption

1. Introducción

El manejo de lodos generados en los procesos de tratamiento de agua para potabilización (PTA) con coagulación química inciden de manera importante en los costos de producción de agua tratada, los cuales tienen relación directa con el tipo y cantidad de coagulante usado; éstos varían entre 0.3 a 1% del volumen de agua tratada (Sandoval et al., 2008) y tienen alto contenido de humedad y resistencia a la deshidratación mecánica, que se dificultan en la medida que se usan mayores dosis de coagulante (Sandoval et al., 2008; Knocke y Walkeland, 1983).

En los sistemas convencionales, la sedimentación produce entre el 60 y 70% del total de los sólidos totales (Arboleda, 2000); dada su naturaleza física, química y microbiológica, su disposición sin ningún tratamiento causa impactos sobre cuerpos de agua, suelos y riesgos a la salud pública (Taylor, 1989; George et al., 1991; Kaggwa et al., 2001; Novaes et al., 2003).

1. Introducción

The sludge management generated in the treatment processes at a water treatment plant (WTP), with chemical coagulation, significantly affects the treated water production costs, which are directly related with the type and amount of coagulants employed. Coagulants vary between 0.3 and 1% of treated water volume (Sandoval et al., 2008) and they have a high content of humidity and mechanical dewatering resistance, which are accentuated as long as higher coagulant dosages are employed (Sandoval et al., 2008; Knocke and Walkeland, 1983).

In conventional systems, the settlement process produces between 60 and 70% of total solids (Arboleda, 2000); because of their physical, chemical and microbiological nature, solids' non-treated disposition impacts water bodies, soils and produces risks for human health (Taylor, 1989; George et al., 1991; Kaggwa et al., 2001; Novaes et al., 2003).

¹ Autor de correspondencia / Corresponding author:
E-mail: patricia.torres@correounivalle.edu.co

Aunque existen experiencias de aplicación en suelos para uso en actividades agrícolas (Zhao y Bache, 2001; Franco y Salvador, 2004), estos lodos no se consideran un material óptimo por su bajo nivel de nutrientes, siendo su uso circunscrito básicamente a actividades silvícolas (Grabarek y Krug, 1987; Scambillis, 1997) y recuperación de suelos degradados y de minas o canteras abandonadas (Geertsema et al., 1994). El uso potencial en la recuperación de aluminio muestra que reduciendo el pH con ácido sulfúrico se alcanza una recuperación del orden del 65 al 75% (Bishop et al., 1987; Rosero, 1998; Lin y Lo, 1998; Franco y Salvador, 2004).

En el sector de la construcción el lodo es aprovechado en la fabricación de cementos Portland (Wang et al., 1998; Mangialardi, 2001) y clinker (Geertsema et al., 1994) y en la producción de ladrillos cerámicos (Mejía y Delvasto, 1998; Nuvalori, 2002; Guimarães y Morita, 2003; Andreoli, 2005 y Hernández, 2006) usándose como reemplazo parcial de uno de los materiales, lo que puede traer beneficios como la disposición ambiental segura para residuos potencialmente peligrosos, reducción de la contaminación hídrica causada por su vertimiento, menores gastos de energía, transporte y fabricación y menor utilización de recursos naturales, la reducción de la vegetación comprometida en la extracción de arcilla (principal componente del ladrillo), aumentando la vida útil de las canteras y puede llegar a reducir los costos de recomposición de áreas con vegetación nativa (Novaes et al., 2003; De Araújo et al., 2005).

El ladrillo cerámico es elemento básico del sector de la construcción y aunque se trata de pequeñas y sencillas piezas, su proceso de elaboración es largo y complejo. Las materias primas son materiales fundentes y estructurantes como las arcillas y arenas respectivamente, las cuales deben adecuarse y seguir un procedimiento de moldeo, secado, cocción y, finalmente, normalización en función de las normas vigentes, que incluyen variables como resistencia a la compresión y absorción de agua (CAP, 2012).

Los estudios de aprovechamiento de los lodos aluminosos en la fabricación de ladrillos cerámicos muestran la necesidad de evaluar contenido de humedad, tamaño de partícula, plasticidad y composición mineralógica, que determinan el comportamiento de variables críticas como la resistencia a la compresión y la absorción. Los mejores resultados fueron obtenidos con porcentajes de lodo alrededor del 10% (Nuvalori, 2002; Hernández, 2006) y realizando una previa reducción de humedad, la cual debe ser optimizada en cada caso.

En la fabricación de ladrillos cerámicos, en Colombia se usan comúnmente arcillas rojas, negras y arena de río dependiendo de las características geológicas del sitio donde se ubican las canteras, presentándose variación en la composición de los materiales, lo que incide directamente en la resistencia y la absorción de las unidades (CAP, 2012). En el presente estudio se evaluó el uso productivo de los lodos aluminosos procedentes de unidades de sedimentación de una PTA, en la elaboración de ladrillos cerámicos.

Although there had been experiences applied on farming soils (Zhao and Bache, 2001; Franco and Salvador, 2004), such sludge is not considered as an optimal material because of its poor nutrients level, thus its use has been basically restricted for forestry activities (Grabarek and Krug, 1987; Scambillis, 1997) and the recovery of deteriorated soils, abandoned mine sites and quarries (Geertsema et al., 1994). The potential use of aluminum recovery demonstrates that by reducing pH by means of sulfuric acid, a recovery of about 65 to 75% is achieved (Bishop et al., 1987; Rosero, 1998; Lin and Lo, 1998; Franco and Salvador, 2004).

In the construction sector sludge is used for manufacturing Portland cement (Wang et al., 1998; Mangialardi, 2001), clinker (Geertsema et al., 1994) and for ceramic bricks production (Mejía and Delvasto, 1998; Nuvalori, 2002; Guimarães and Morita, 2003; Andreoli, 2005 and Hernández, 2006). By partially replacing one component material by sludge may lead to important benefits such as a safe potentially-dangerous-residues environmental disposition; water pollution reduction caused by its disposal; lower energy, transportation and manufacture costs; lower natural resources use; reduction of existing vegetation compromised in clay extraction process (main brick component); thus increasing quarries' life span and possibly reducing costs of replacing native vegetation (Novaes et al., 2003; De Araújo et al., 2005).

Ceramic brick is an essential element in the construction sector. Although bricks are small and simple pieces, their elaboration takes a long and complex process. Raw materials correspond to flux and structural materials such as clay and sand, respectively. They shall fit and endure casting, drying and firing processes. Finally, they undergo a normalization process according to standard regulations, which include variables such as compression resistance and water absorption (CAP, 2012).

Application studies on aluminous sludge for ceramic bricks elaboration indicate the need of evaluating humidity content, particle size, plasticity and mineralogical decomposition that determine the behavior of critical variables, such as compression resistance and water absorption. Best results were achieved by using a sludge percentage of 10% approximately (Nuvalori, 2002; Hernández, 2006) and previously reducing humidity content, which should be optimized in each case.

In Colombia ceramic brick manufacture usually employs red clays, black clays and river clays depending on geological characteristics of the site where quarries are located, thus showing a variation on material composition, which directly affects the units' resistance and absorption (CAP, 2012). The present study evaluated the productive use of aluminous sludge coming from sedimentary units in a WTP for ceramic bricks elaboration.

2. Discusión y desarrollo

2.1 Parte experimental

2.1.1 Características del lodo y los materiales constitutivos de los ladrillos cerámicos

El estudio se realizó, en una PTA convencional con coagulación con sulfato de aluminio, floculación, sedimentación, filtración, desinfección y acondicionamiento de pH, con un caudal de 600 L/seg. Los lodos procedían del lavado y vaciado de las unidades de sedimentación, los cuales fueron sometidos a sedimentación por un periodo de 24 horas y posteriormente deshidratados en lechos de secado en arena durante 48 horas para reducir humedad y se caracterizaron en términos de la composición mineralógica por difracción de rayos X (con secado previo durante 24 horas a 105°C), tamaño de partículas mediante el uso de un hidrómetro y la plasticidad a través de los límites de Atterberg.

Las características mineralógicas del lodo fueron comparadas con las de los materiales constitutivos del ladrillo en la zona de estudio (arcilla roja – 40 a 60%; arcilla negra – 20 a 30% y arena – 20 a 30%) para seleccionar el material con características más similares que permitieran realizar un reemplazo parcial por lodo aluminoso.

2.1.2 Fabricación de las unidades experimentales

Se usaron probetas de 4 x 4 x 8 cm y para el análisis estadístico se utilizó un Diseño de Bloques Completamente Aleatorizados (DBCA) unifactorial (porcentaje de arena reemplazada por lodo). En la validación fueron utilizadas las pruebas de Kolmogorov – Smirnov, Durbin–Watson y Levene para verificar los supuestos de normalidad, incorrelación y homocedasticidad de los residuos respectivamente (Kuehl, 2001; Montgomery, 2002). Los porcentajes de arcilla roja y arcilla negra se mantuvieron constantes (50 y 25% respectivamente) y se tomaron muestras de lodos características de períodos climáticos invierno (periodo lluviosos) y verano (periodo seco), realizando diez repeticiones por muestra. La Tabla 1 muestra los porcentajes de arena y lodo aluminoso evaluados.

2. Discussion and development

2.1 Experimental Stage

2.1.1 Characteristics of sludge and component materials of ceramic bricks

The study was conducted at a conventional WTP using aluminum sulfate coagulation, flocculation, sedimentation, filtering, disinfection and pH fitting out, with a volume flow of 600L/sec. Sludge resulted from washing and dumping sedimentary units, which were subjected to a sedimentary process during a 24-hour period. Afterwards they were dewatered on sand drying beds during 48 hours to reduce humidity and they were characterized in terms of mineralogical decomposition by x-ray diffraction (after 24-hour drying process at 105°C); particle size was determined by means of a hydrometer and, plasticity by using Atterberg's limits.

Sludge mineralogical characteristics were compared to bricks' component materials in the study field (red clay – 40 to 60%; black clay – 20 to 30%, sand – 20 to 30%) to select the material with the most similar characteristics so as to partially replace it by aluminous sludge.

2.1.2 Elaboration of experimental units

Specimens of 4 x 4 x 8 cm were employed; for the statistical analysis a unifactorial Complete Randomized Block Design (DBCA) was used (percentage of sand replaced by sludge). For the validation process the Kolmogorov – Smirnov, Durbin–Watson and Levene's tests were applied to check assumed normality, inter-correlation, homoscedasticity of the respective residues (Kuehl, 2001; Montgomery, 2002). The percentages of red clay and black clay kept their constant level (50 and 25%, respectively). Sludge samples were taken, which are typical in winter season (rainy periods) and summer season (dry period) by executing ten repetitions per sample. Table 1 shows the sand and aluminous sludge evaluated percentages.

Tabla 1. Niveles y Factores Según Porcentaje de Arena a Reemplazar por Lodo Aluminoso*
Table 1. Levels and Factors according to Sand Percentage to be replaced by Aluminous Sludge*

Niveles/Levels	% Arena reemplazar por lodo aluminoso Sand percentage to be replaced by aluminous sludge	Arena/Sand (%)	Lodo alum (%) Alum sludge
1	0	25	0
2	10	22,5	2,5
3	20	20	5
4	30	17,5	7,5
5	40	15	10
6	100	0	25

*El porcentaje de arcilla roja y negra se mantuvieron constantes (50 y 25% respectivamente)

*The percentages of red clay and black clay kept their constant level (50 and 25%, respectively)



En las probetas se garantizó una humedad del 20% de la masa final y fueron moldeadas y secadas a temperatura ambiente durante 6 días; posteriormente se sometieron a quemado en una mufla, con incremento de temperatura de 100°C por hora hasta alcanzar 700°C y ascender directamente a 900°C durante 6 horas. El enfriamiento se realizó con una dinámica inversa a la del calentamiento. Las variables de respuesta fueron resistencia a la compresión y absorción de humedad (ICONTEC, 2003).

2.2 Resultados y Discusión

2.2.1 Características del lodo y los materiales constitutivos de los ladrillos cerámicos

El lavado y vaciado de los sedimentadores genera la mayor cantidad de lodos (90.1% del total) con 99.77% de humedad, valor típico de lodos aluminosos (73 a 99%) (Espejel et al., 2008). El acondicionamiento aplicado permitió reducir la humedad a 72.69%, valor próximo de lo encontrado por Reynolds y Richards, (1995) y Guimarães y Morita, (2003), los cuales consiguieron concentraciones entre el 29 y 30% aplicando métodos de deshidratación natural. Para efectos de su incorporación a la masa arcillosa, se reportan valores de humedad desde 55% (Guimarães y Morita, 2003; Andreoli, 2004) hasta 100% (Nuvalori, 2002).

Con relación a la composición mineralógica, las Figuras 1 a 3 muestran la comparación del difractograma del lodo aluminoso con los de la arcilla roja, la arcilla negra y la arena respectivamente.

For specimens' humidity, a 20% final mass was ensured. They were casted and dried at room temperature during 6 days. Afterwards they were dried by a muffle furnace thus increasing temperature at 100°C per hour, until achieving 700°C and, then directly rising up to 900°C during 6 hours. Cooling was executed by means of an inverse dynamic to heating. The response variables were compression resistance and water absorption (ICONTEC, 2003).

2.2 Results and Discussion

2.2.1 Characteristics of sludge and component materials of ceramic bricks

Washing and dumping sedimentary units generate the highest amount of sludge (90.1% in total); having a 99.77% of humidity, which typical aluminous sludge value is 73 to 99% (Espejel et al., 2008). The applied conditioning process enabled a humidity reduction down to 72.69%, which is the closest value to the one achieved by Reynolds and Richards, (1995), Guimarães and Morita, (2003). They were able to obtain concentrations between 29 and 30% by applying natural dewatering methods. For incorporation into the clay mass purposes, humidity values from 55% (Guimarães and Morita, 2003; Andreoli, 2004) up to 100% (Nuvalori, 2002) are reported.

In regards to mineralogical composition, Figures 1 to 3 show diffraction of aluminous sludge compared to red clay, black clay and sand clay diffraction, respectively.

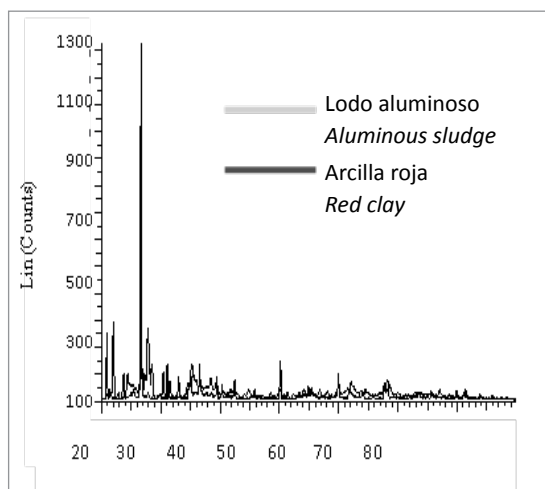


Figura 1. Comparación mineralógica del lodo aluminoso con arcilla roja
Figure 1. Mineralogical comparison of aluminous sludge to red clay

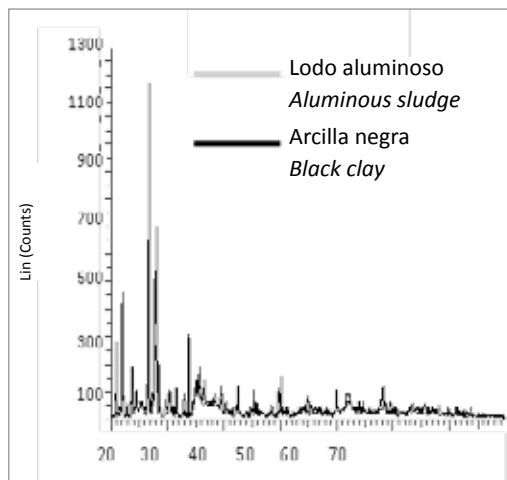


Figura 2. Comparación mineralógica del lodo aluminoso con arcilla negra
Figure 2. Mineralogical comparison of aluminous sludge to black clay

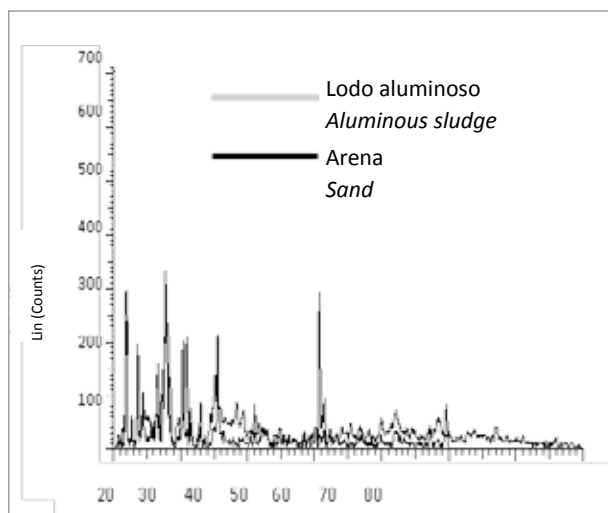


Figura 3. Comparación mineralógica del lodo aluminoso con arena
Figure 3. Mineralogical comparison of aluminous sludge to sand

El análisis del lodo mostró alta presencia de cuarzo con relación a los demás elementos, al igual que ausencia de silicatos y bajo nivel de caolinita. La presencia de cuarzo puede estar asociada a materiales arrastrados por el sistema de tratamiento que son característicos de la región (De Araújo et al., 2005). El análisis de lodos aluminosos de las unidades de sedimentación de una PTA en Brasil mostró también baja presencia de caolinita (Nuvalori, 2002). Estudios reportados por Mejía y Delvasto (1998) y Guimarães y Morita (2003) en Colombia y Brasil respectivamente, muestran composiciones mineralógicas similares a las encontradas en el lodo aluminoso evaluado, siendo la arena el material que presenta mayor similitud con el mismo.

The granulometric analysis sludge showed a high quartz content in regards to the other elements, as well as the absence of silicates and low kaolin content. The presence of quartz might be associated to materiales swept by the treatment system, which is typical from the region (De Araújo et al., 2005). Aluminous sludge analysis from a sedimentary unit, at a WTP in Brazil, also showed a low kaolin content (Nuvalori, 2002). Studies reported by Mejía and Delvasto (1998) and Guimarães and Morita (2003) in Colombia and Brazil, respectively, show similar mineralogical compositions to the ones found in the evaluated aluminous sludge. Being sand the element that has the closest similarity to aluminous sludge.

El análisis granulométrico mostró que las partículas sólidas que conforman los lodos son finas y de tamaño reducido, 55.5% con tamaño inferior a 0.025mm y con predominancia de limos sobre arcillas. Guimarães y Morita (2003) reportan que el 70% de las partículas del lodo presentan diámetros entre 0.002 y 0.020 mm y Mejía y Delvasto (1998) reportan tamaños entre 0.040 y 0.060 mm. Según Pracidelli y Melchiades (1997), los ladrillos cerámicos deben contener 20 a 30% de partículas con diámetro inferior a 0.002 mm, 20 a 55% entre 0.002 y 0.020 mm y entre 20 y 50% mayor a 0.020 mm. De acuerdo con estos valores, los lodos aluminosos se muestran adecuados para su potencial incorporación en la fabricación de ladrillos cerámicos.

El Límite de Atterberg del lodo mostró un Límite Líquido (L.L) de 78.2%, un Límite plástico (L.P) de 74% y un Índice de plasticidad (Pi) de 4.2%; teniendo en cuenta que este último es inferior a 7, el lodo se clasifica como material poco plástico y parcialmente cohesivo, características que son típicas de la arena. En general, la composición mineralógica, la granulometría y el límite de Atterberg, muestran que con el material constitutivo del ladrillo que el lodo aluminoso presenta mayor similitud es con la arena, por lo que se considera adecuada la evaluación del reemplazo de la arena por este material.

2.2.2 Influencia del reemplazo de arena por lodo aluminoso

ICONTEC (2003) establece propiedades físicas de las unidades de mampostería de arcilla cocida, ladrillos y bloques cerámicos para unidades de uso estructural y no estructural (resistencia mínima 150 y 100 kg/cm² respectivamente y absorción entre 14 y 16% y 14 y 20% para uso exterior e interior respectivamente) y considera como defectos principal y secundario el no cumplimiento de la resistencia a la compresión y de la absorción respectivamente. En las unidades control (0% arena reemplazada por lodo), se encontraron valores que catalogarían los bloques construidos como aptos para uso no estructural; sin embargo, las normas española (AECOM, 2005) y brasilera (ABNT, 1992) establecen menos de 100 kg/cm² para la resistencia a la compresión y hasta 16% y entre 8 y 25% respectivamente para la absorción, lo que indica que los bloques control satisfacen los requerimientos. En la Figura 4 se observa el comportamiento de las variables de respuesta en función del porcentaje de arena reemplazada por lodo.

Sieve analysis showed that solid particles comprised in sludge are fine and small particles; the 55% has a size lower than 0.025mm, where lime is predominant over clays. Guimarães and Morita (2003) reported that 70% of sludge particles have diameters between 0.002 and 0.20 mm. Mejía and Delvasto (1998) reported sizes between 0.040 and 0.060 mm. According to Pracidelli and Melchiades (1997), ceramic bricks must have from 20 to 30% of particles, which diameter must be lower than 0.002 mm; from 20 to 50% between 0.002 and 0.020 mm and; from 20 to 50% higher than 0.020mm. In accordance with these values, aluminous sludge is adequate for its potential incorporation in ceramic bricks manufacture.

Sludge Atterberg's limit showed a Liquid Limit (L.L) of 78.2%, a Plastic Limit (P.L) of 74% and a Plasticity Index (PI) of 4.2%. Taking into account that the latter is lower than 7, sludge is regarded as a poorly plastic material and partially cohesive material, which characteristics are typical from sand. In general mineralogical composition, grain size distribution and Atterberg's limit show that sand is the brick component material that has the closest similarity to aluminous sludge. Therefore, the evaluation for replacing sand by aluminous sludge it is considered appropriate.

2.2.2 Effects from replacing sand by aluminous sludge

ICONTEC (2003) states physical properties for masonry units made up from fired clay; bricks and ceramic blocks for structural and non-structural use (minimal resistance 150 to 100 kg/cm² respectively; water absorption between 14 and 16% and 14 and 20% for outer and inner use, respectively). It also considers that not fulfilling compression resistance and absorption as the primary and secondary defects, respectively. In control units (0% sand replaced by sludge), the obtained values would rate the constructed blocks as suitable for non-structural use. However, the Spanish regulation (AECOM, 2005) and Brazilian regulation (ABNT, 1992) establish less than 100 kg/cm² for compression resistance at 16% and absorption between 8 and 25%, respectively, which indicates that control blocks meet the requirements. Figure 4 shows the response variables behavior in function of sand percentage replaced by sludge.

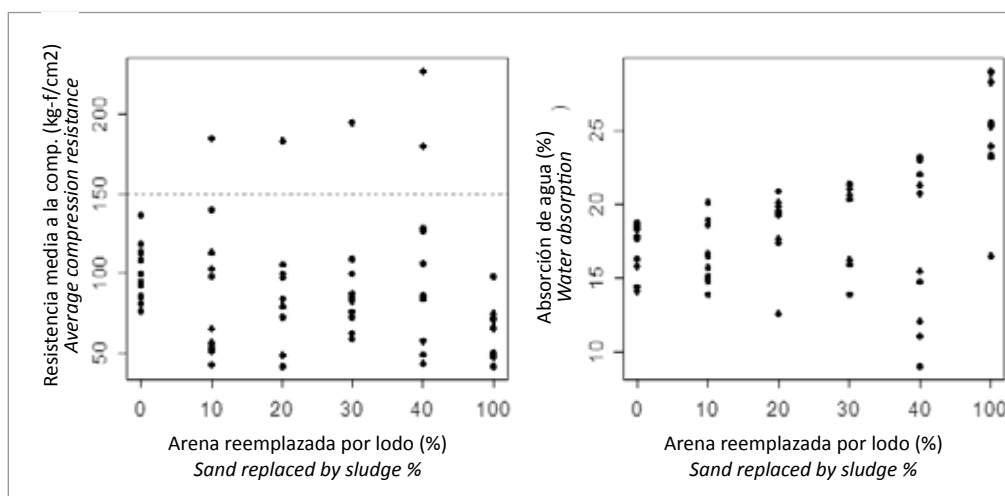


Figura 4. Dispersión Resistencia media a la compresión y Absorción de agua
Figure 4. Dispersion of Average Compression Resistance and Water Absorption



El primer aspecto a destacar en la figura es la alta dispersión de las unidades experimentales en las que se adicionó lodo comparadas con los bloques sin lodo (0% arena reemplazada por lodo); este comportamiento se puede deber a la diferencia en la dosificación de sulfato de aluminio, la cual se incrementa en época invernal, lo que hace que el lodo contenga mayores concentraciones de hidróxidos de aluminio que incrementan su contenido de alúmina (Al_2O_3) y que de acuerdo con investigaciones como las de Chen-Feng y Yung-Chao (1994), Salvini et al. (2001) y Stamenković et al. (1977) conllevaría a productos finales más resistentes.

CAP (2012) afirma que contenidos de alúmina del 20 al 30% imparten plasticidad a la arcilla, pero un exceso puede provocar contracciones altas en el secado de los ladrillos cerámicos. Estos estudios sugieren la necesidad de definir los rangos adecuados de concentración de alúmina en el lodo aluminoso que potencien su uso en la fabricación de los ladrillos cerámicos. En la figura también se observa una tendencia decreciente de la resistencia a la compresión y creciente de la absorción de agua a medida que se incrementó el porcentaje de lodo. La Tabla 2 muestra el resumen del análisis de varianza y validación de supuestos.

The first aspect to be highlighted on above figure is the high dispersion of experimental units containing sludge compared to blocks not containing sludge (0% sand replaced by sludge). This behavior may be caused due to the differences of aluminum sulfate dosages, which are increased during winter season thus leading to higher amounts of aluminum hydroxides contained in the sludge, which increases its alumina content (Al_2O_3). According to studies developed by Chen-Feng and Yung-Chao (1994), Salvini et al. (2001) and Stamenković et al. (1977) above would lead to more resistant final products.

CAP (2012) states that alumina content of 20 to 30% provides clay plasticity, but exceeding such percentages may lead to high contractions during ceramic bricks' dry process. Such studies suggest the need to define adequate ranges of alumina concentration in aluminous sludge to increase its use in the elaboration of ceramic bricks. The figure also shows a downwards trend of compression resistance and water absorption as long as sludge percentage was increased. Table 2 Summary for variance analysis and assumptions validation

Tabla 2. Resumen análisis de varianza y validación de supuestos DCA
Table 2. Summary for variance analysis and assumptions validation DCA

Prueba/ Test	Resistencia media a la compresión/ Average Compression Resistance	Absorción de humedad/ Water Absorption
Transformación/ Transformation	Y	log(Y)/ log(Y)
Análisis de Varianza/ Variance analysis		
Valor p/ p Value	0.045	1.967E-13
R ² (%)	19.73	78.02
Coef. Var (%)/ Var Coeff. (%)	29.87	3.03
Validación de Supuestos/ Assumptions validation		
Kolmogorov - Smirnov	0.846	0.759
Levene	0.097	0.023
Durbin-Watson	0.994	0.000

En el modelo aplicado a la resistencia media a la compresión, se encontró que al menos uno de los porcentajes evaluados tiene un efecto estadísticamente diferente que los demás (valor p = 0.045 < 0.05); las pruebas para la validación de los supuestos muestran que no existe evidencia que indique inadecuación del modelo. La prueba post-anova de Diferencias Honestamente Significativas de Tukey, bajo una significancia del 5%, indica que solo el porcentaje de reemplazo 100% conlleva a una resistencia media estadísticamente inferior a la encontrada en las probetas con 0% de reemplazo.

In the model applied to average compression resistance, it was found that at least one of evaluated percentages has a statistically different effect (p value 0.045 < 0.05). Assumption validation tests show that there is no evidence demonstrating that the model is inappropriate. The post-ANOVAs test on Honestly Significant Differences developed by Tukey, under 5% significance, indicates that only a 100% replacement leads to a compression resistance statistically lower compared to samples with 0% replacement.

Por otro lado, se encontró de igual forma que el porcentaje de arena reemplazada por lodo aluminoso tiene un efecto estadísticamente significativo sobre la absorción de agua; a pesar de esto, el modelo empleado es inadecuado para hacer tales estimaciones debido a que los supuestos de homogeneidad de varianzas e incorrelación de los errores no fueron validados satisfactoriamente (valores $p < 0.05$), lo que conlleva al uso de la prueba no paramétrica de Kruskal – Wallis, encontrándose un valor p igual a $8.79e-08$ indicando que el porcentaje de reemplazo de arena por lodo afecta significativamente la absorción de las probetas experimentales. Usando contrastes múltiples, se puede concluir que el porcentaje de reemplazo 100% maximiza la absorción mientras que los porcentajes 0 y 10% la minimizan; de igual forma, los porcentajes 30% y 40% no presentan diferencias significativas entre sí, pero tienen un efecto sobre la absorción superior al que se alcanza con el porcentaje 20%.

En general, aunque el único porcentaje que presenta diferencias significativas es el 100%, dado que el incremento en la incorporación de lodo genera una tendencia creciente en términos de absorción de agua y decreciente en términos de resistencia a la compresión, el porcentaje de lodo más adecuado que podría ser incorporado para la fabricación de los ladrillos cerámicos sería el de 10%.

Se destaca que en las probetas en las que reemplazaron porcentajes iguales o mayores al 40%, se observó un color más oscuro después del sexto día de secado (antes de la cocción), lo que indica menor pérdida de humedad debido posiblemente a las características higroscópicas del lodo aluminoso, retardando el secado de las unidades, lo que sugiere que en el evento de aplicar la presente alternativa a escala real, es recomendable incrementar el periodo de secado antes de la cocción o aumentar la reducción de humedad del lodo antes de su incorporación para la fabricación de los ladrillos cerámicos. Chen-Feng y Yung-Chao (1994) evidenciaron que a pesar de que los lodos aluminosos presentan alta compresibilidad, también retienen la humedad; Stamenković et al. (1977) indican que la compresibilidad del lodo produce un flujo de filtrado independiente de la presión aplicada, confirmando una de las características reportadas por Chen-Feng y Yung-Chao (1994), Kaggwa et al. (2001) y Salvini et al. (2001), en cuanto a la alta resistencia a la deshidratación mecánica que presentan los lodos aluminosos.

Andreolli (2004) obtuvo resistencias a la compresión entre 80 y 100 kg/cm² incorporando 4.17% de lodos aluminosos en ladrillos cerámicos, con una humedad del 55%. Nuvalori (2002) logró resistencias a la compresión de 250 kg/cm² adicionando 10% de lodo y 150 kg/cm² adicionando 20, 30 y 40%; sin embargo, el lodo fue totalmente deshidratado antes de su incorporación a la masa arcillosa. Guimarães y Morita (2003) citan que es posible mezclar hasta 90% de lodo aluminoso con apenas 10% de arcilla, siempre que el lodo esté totalmente seco; con 40% de humedad, se podría incorporar el 45% de lodo y con 75%, solamente se podría incorporar 10%. Aunque en el estudio las probetas fueron elaboradas incorporando arcilla roja, negra y arena, también se alcanzó un porcentaje de reemplazo de arena adecuado del orden del 10% para la humedad del lodo de aproximadamente 73%.

On the other hand, it was discovered that the percentage of sand replaced by aluminous sludge has a statistically significant effect on water absorption. However, the employed model is inappropriate to conduct such calculations, since variance homogeneity assumptions and the errors correlation were not satisfactorily validated (values $p < 0.05$); which lead us to employ a non-parametric test developed by Kruskal – Wallis, thus finding a p value equal to $8.79e-08$, which indicates that sand percentage replaced by sludge significantly affects water absorption on the experimental specimens. By employing multiple contrast media, we can conclude that 100% replacement maximizes absorption while percentages from 10 to 10% minimize it. Similarly percentages between 30% and 40% do not represent significant differences between them, but they do have a higher effect on absorption than the one achieved by a 20% replacement.

In general, although the only percentage showing significant differences is 100% replacement, since sludge incorporation increase generates an upwards trend in terms of water absorption and downwards in terms of compression resistance, the most appropriate sludge percentage to be incorporated in ceramic bricks elaboration would be 10%.

Specimens that replaced percentages equally or higher than 40%, turned out to be darker after the sixth drying-process day (before firing), which indicates a lower humidity loss, possibly due to hygroscopic characteristics of aluminous sludge, which delay drying process; thus suggesting that for applying this alternative at full scale, it is recommended to increase drying period before firing or to increase sludge's humidity reduction before incorporating it to ceramic bricks elaboration. Chen-Feng and Yung-Chao (1994) evidenced that, in spite of the fact aluminous sludge has a high compressibility, it also retains humidity. Stamenković et al. (1977) indicate that sludge compressibility produces an independent filtered flow of applied pressure, thus confirming one of the characteristics reported by Chen-Feng and Yung-Chao (1994), Kaggwa et al. (2001) and Salvini et al. (2001) as far as the high mechanical dewatering resistance endured by aluminous sludge is concerned.

Andreolli (2004) obtained compressive resistances between 80 and 100 kg/cm² by incorporating 4.17% of aluminous sludge to ceramic bricks, with 55% humidity. Nuvalori (2002) achieved a 250 kg/cm² compression resistance by adding 10% of sludge and 250 kg/cm² by adding 20, 30 and 40%. However, sludge was totally dewatered before adding it to the clay mass. Guimarães and Morita (2003) quoted that it is possible to mix up to 90% of aluminous sludge with only 10% of clay, as long as sludge is completely dewatered. With 40% humidity, it would be possible to add 45% of sludge; and with 75% humidity it would only be possible to add 10% of sludge. Although in this study specimens were elaborated by incorporating red clay, black clay and sand; a high appropriated sand replacement percentage of about 10% was also achieved for sludge humidity of 73% approximately.

Espejel et al. (2008) encontraron 29% de absorción de humedad en unidades experimentales cerámicas fabricadas con 50% de lodos de potabilización y ratificaron el incremento en la porosidad de los ladrillos al utilizar lodo aluminoso como agregado. Para minimizar estos impactos negativos, que pueden reducir la resistencia a la compresión e incrementar el contenido de humedad, Zhao (2002) indica la necesidad de acondicionadores físicos para obtener una estructura más rígida; Benitez et al (1994), Moehle (1967) y Zouboulis y Guitonas (1995) citan materiales como ceniza de incineradores, cemento, cal viva, cal hidratada, carbón fino, bagazo, astillas de madera y residuos de trigo para optimizar la deshidratación del lodo aluminoso.

3. Conclusiones y Recomendaciones

Las composición mineralógica, el análisis granulométrico y el Límite de Atterberg del lodo procedente de la etapa de sedimentación de procesos de potabilización de agua con sulfato de aluminio, muestran que entre los materiales constitutivos del ladrillo evaluado (arcilla roja, arcilla negra y arena), con el que mayor similitud presenta, es con la arena, presentando potencialidad de reemplazo parcial de la misma.

La dosificación de sulfato de aluminio en los procesos de potabilización, que está asociada a las características del agua cruda (condiciones de verano o invierno) presenta influencia sobre las características del lodo sedimentado, lo que puede afectar las características del mismo en términos de su potencialidad como material aprovechable para la preparación de ladrillos cerámicos, ya que incide sobre la resistencia a la compresión y la absorción de agua.

Aunque el acondicionamiento previo de los lodos, consistente en sedimentación por 24 horas y deshidratación en lechos de secado por 48 horas, permitió reducir el contenido de humedad hasta 72,69%, se deben explorar técnicas más eficientes de deshidratación que reduzcan significativamente la humedad del lodo e incrementen su potencialidad de aprovechamiento en reemplazo parcial de la arena, ya que permitiría reducir la porosidad de las unidades y no comprometer la resistencia a la compresión.

Los resultados muestran que un reemplazo de arena por lodo del 10% se puede considerar un porcentaje adecuado en la fabricación de ladrillos cerámicos, ya que con valores superiores se comprometen de manera significativa la absorción de agua y principalmente la resistencia a la compresión. Esta implementación permitiría reducir costos de producción, además de minimizar los impactos ambientales por el vertimiento de estos lodos directamente a los cuerpos de agua como ocurre actualmente.

Es recomendable continuar explorando esta alternativa de aprovechamiento para definir las condiciones óptimas de incorporación de lodos aluminosos en la fabricación de ladrillos cerámicos.

4. Agradecimientos

Los autores agradecen a Colciencias, la Universidad Tecnológica de Pereira y la Universidad del Valle por el apoyo para la realización de este trabajo de investigación.

Espejel et al. (2008) found a 29% of humidity absorption in the ceramic experimental units elaborated with 50% of purification sludge and they confirmed the bricks' porosity increase when employing aluminous sludge as aggregate. So as to minimize these negative impacts, which might reduce compression resistance and increase humidity content, Zhao (2002) highlighted the need of counting with physical conditioners to obtain a stiffer structure. Benitez et al (1994), Moehle (1967) and Zouboulis and Guitonas (1995) quote materials such as incinerator ashes, cement, limestone, hydrated lime, fine coal, bagasse, wooden chips and wheat residues to optimize aluminous sludge dewatering.

3. Conclusions and Recommendations

Mineralogical composition, granulometric analysis and Atterberg's Limit for sludge coming from the stage of sedimentation processes on purifying water with aluminum sulfate, show that among component materials of the evaluated brick (red clay, black clay and sand) the sand is closely similar to sludge, thus suggesting its potential and partial replacement.

The dosage of aluminum sulfate for purifying processes associated to raw water characteristics (summer and winter conditions), influences the sedimented sludge features, which can affect its characteristics as far as its potential use for ceramic bricks elaboration is concerned, because such dosage affects compression resistance and water absorption.

Although a preliminary sludge conditioning, (consisting of a 24-hour sedimentation process and a dewatering process on drying beds during 48 hours) enabled the reduction of humidity content down to 72.69 %; more effective dewatering techniques shall be explored so as to significantly reduce sludge humidity and increase its potential by partially replacing sand. This could reduce units' porosity, without affecting compression resistance.

Results show that a sand replacement by 10% of sludge can be considered as an appropriate percentage for ceramic bricks elaboration, since higher values significantly affect water absorption and mainly compression resistance. Such implementation would lead to lower production costs, besides minimizing environmental impacts due to sludge disposal onto water bodies as it uses to occur nowadays.

It is recommended to continue exploring this alternative to define optimum conditions for the addition of aluminous sludge on the elaboration of ceramic bricks.

4. Acknowledgements

Authors thank to Colciencias, Universidad Tecnológica de Pereira and Universidad Del Valle for their support on the development of this research job.



5. Referencias/References

- Andreoli V. C. (2005)**, Utilización de Lodos Aluminosos como Materia Prima en la Industria Cerámica, Programa de Pesquisas em Saneamento Básico – PROSAB, Companhia de Saneamento do Paraná – SANEPAR, Brasil.
- Andreoli V. C. (2004)**, Utilização de Resíduos do Saneamento como Matéria-Prima para Produtos Cerâmicos e Substrato para Produção Vegetal, Programa de Pesquisas em Saneamento Básico – PROSAB, Companhia de Saneamento do Paraná – SANEPAR, Brasil.
- Arboleda J. (2000)**, Teoría y Práctica de la Purificación del Agua, Mc-Graw Hill, Colombia.
- Asociación de Empresas de la Construcción de Madrid – AECOM. (2005)**, Especificaciones para Ladrillos Cerámicos, del Convenio Colectivo del Grupo de Construcción y Obras Públicas de la Comunidad de Madrid, Norma Española, España.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. (1992)**, NBR 07171. Bloco Cerâmico para Alvenaria, Brasil.
- Benítez J., Rodríguez A., Suarez A. (1994)**, Optimisation technique for sewage sludge conditioning with polymer and skeleton builders, *Water Research*, 28 (10), 2067-2073.
- Bishop M. M., Rolan A. T., Bailey T. L., Cornwell D. A. (1987)**, Testing of alum sludge for solids reduction and reuse, *Journal of the American Water Works Association*, 79 (6), 76–83.
- CAP - CONSTRUAPRENDE (2012)**, Práctica 1: Laboratorio de cerámicos, Disponible en: http://www.construaprende.com/Lab/1/Prac1_1.html, Consultado el 20 de Febrero de 2012.
- Chen-Feng Ch., Yung-Chao K. (1994)**, Effect of rare-earth oxide concentrate on reactions, Densification and Slag Resistance of Al₂O₃-SiO₂ Ceramic Refractories, *Ceramics International*, 20 (1), 31 - 37.
- De Araújo F.; Leite J. Y., De Araújo A., Ingunza M. (2005)**, Caracterização de Matérias-Primas para Reuso de Lodo de ETE em Produtos Cerâmicos, 23 Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Campo Grande, Brasil.
- Espejel F., Rodríguez A., Cerón O., Ramírez R. (2008)**, Valoración de los Lodos Generados en una Planta Potabilizadora para Elaborar Productos Cerámicos, XVI Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales, Ciudad de México, México.
- Franco P. A. O., Salvador J. V. R. (2004)**, Caracterización, Acondicionamiento y Aprovechamiento de Lodos Generados en Plantas de Potabilización de Agua. Tesis de Tecnología Química, Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia.
- Geertsema W. S., Knocke W.R., Novak J. T., Dove D. (1994)**, Long-term effects of sludge application to land, *Journal of the American Water Works Association*, 86 (11), 64-74.
- George D. B., Berk S. G., Adams V. D., Morgan E. L., Roberts R. O., Holloway C., Lott R. C., Holt L. K., Thing R. S., Welch A. W. (1991)**, Alum Sludge in the Aquatic Environment, Research Foundation and Journal of the American Water Works Association – AWWAR, Estados Unidos.
- Grabarek R. J., Krug E.C. (1987)**, Silvicultural application of alum sludge, *Journal of the American Water Works Association*, 79 (6), 84–88.
- Guimarães M., Morita D. (2003)**, Incorporação de Lodo de Estações de Tratamento de Água em Blocos Cerâmicos. Iniciação Científica Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, Universidade de São Paulo, Brasil, 2003.
- Hernández D. (2006)**, Aprovechamiento de Lodos Aluminosos (de la Etapa de Sedimentación) de Sistemas de Potabilización como Agregado en la Fabricación de Ladrillos Cerámicos, Tesis Maestría en Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle, Colombia.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas (ICONTEC). (2003)**, Norma Técnica Colombiana Ingeniería Civil y Arquitectura - Unidades de Mampostería de Arcilla Cocida - Ladrillos y Bloques Cerámicos - NTC 4205, Colombia.
- Kaggwa R. C., Mulalelo C. I., Denny P., Okurut T. O. (2001)**, The impact of alum discharges on a natural tropical wetland in Uganda, *Water Research*, 35 (3), 795-807.
- Knocke W. R., Walkeland D. L. (1983)**, Fundamental characteristics of water treatment plant sludges, *Journal of the American Water Works Association*, 75 (10), 516-523.
- Kuehl R. O. (2001)**, Diseño de Experimentos: Principios Estadísticos de Diseño y Análisis de Investigación, Thomson Learning, México.
- Lin S. H., Lo M. C. (1998)**, Recovery of aluminum from waste anode-oxidizing solution, *Waste Management*, 18 (4), 281-286.
- Mangialardi T. (2001)**, Sintering of MSW fly ash for reuse as a concrete aggregate, *Journal of Hazardous Materials*, 87 (1 - 3), 225 - 239.
- Mejía R., Delvasto S. (1998)**, Aprovechamiento de Lodo Aluminoso Generado en el Proceso de Potabilización del Agua, EMCALI EICE ESP - Universidad del Valle, Colombia.
- Moehle F. W. (1967)**, Fly ash aids in sludge disposal, *Environ. Sci. Technol*, 1 (5), 374 - 379.
- Montgomery D. C. (2002)**, Diseño y Análisis de Experimentos, Limusa Wiley, México.
- Novaes R., Isaac R., Morita D. (2003)**, Incorporação de Lodo de ETA na Indústria Cerâmica, Seminário de Acompanhamento de Pesquisa em Saneamento e Ambiente, Campinas, São Paulo, Brasil.
- Nuvalori A. (2002)**, Inertização de Biossólidos em Tijolos Cerâmicos Maciços: Aspectos Tecnológicos e Ambientais, Tesis Doutorado em Engenharia Civil. Campinas: Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Brasil.
- Pradelli S., Melchades F. G (1997)**, Importância da composição granulométrica de massas para a cerâmica vermelha. *Cerâmica Industrial*, 2 (1), 31 - 35.
- Ramírez R., Chantal N., Millán S., Espejel F., Rodríguez A., Rojas M. (2006)**, Aprovechamiento de los Lodos Generados en la Planta Potabilizadora Los Berros, Sistema Cutzamala, Primera Etapa. Proyecto 7.3.4, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Reynolds T. D., Richards P. A. (1995)**, Unit Operations and Processes in Environmental Engineering. PWS Publishing Company, Estados Unidos.
- Rosero M. M. (1998)**, Recuperación de Sulfato de Aluminio de Lodos Generados Durante el Proceso de Potabilización de Agua. Tesis Química. Facultad de Ciencias, Universidad del Valle, Colombia.
- Salvini V. R., Innocentini M. D. M., Rodrigues J. A., Pandolfelli V. C. (2001)**, Creep in Al₂O₃ ceramic filters, *Cerâmica*, 47 (304), 193 - 198.
- Sandoval L., Flores L. M., Montellanos L., Morán M. A., Rubi R., Sánchez L. O., Santana M. L., Vásquez S., Martín A. (1998)**, Tratabilidad de los Lodos Producidos en la Coagulación de Aluminio en la Potabilización del Agua, Seminario Regional Bienal sobre la potabilización filtración. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). Septiembre de 1998. Jiutepec, Morelos, México.
- Scambillis, N. (1997)**, Effect of Chemical Sludge on Soils. Tesis de doctorado. Universidad de Missouri, Estados Unidos.
- Stamenković I., Simičić V., Sigulinski F., Martinović P., Stefanović R. (1977)**, Properties of Al₂O₃ - SiO₂ heat insulating refractories, *Ceramurgia International*, 3 (4), 168 - 168.
- Taylor G. J. (1989)** Aluminum Toxicity and Tolerance in Plants. Acidic Precipitation: Biological and Ecological Effects. In *Advances in Environmental Science*, Adriano, D.C. and Johnson, A.H. (eds.).
- Wang K., Chiang K., Perng J., Sun C. (1998)**, The characteristics study on sintering of municipal solid waste incinerator ashes, *Journal of Hazardous Materials*, 59 (2-3), 201 - 210.
- Zhao Y. Q., Bache D. H. (2001)**, Conditioning of alum sludge with polymer and gypsum, *Colloids and Surfaces, A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 194 (1), 213-220.
- Zhao Y. Q. (2002)**, Enhancement of alum sludge dewatering capacity by using gypsum as skeleton builder, *Colloids and surfaces A: Physicochemical and engineering aspects*, 211 (2-3), 205 - 212.
- Zouboulis A. I., Guitonas A. (1995)**, Use of fly ash as conditioning agent for improving biological sludge dewaterability by filter press, *Fresenius Environmental Bulletin*, 4 (6), 387-392.

