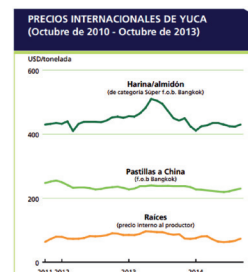


Valorización de lodos procedentes de plantas de tratamiento de agua potable. Una apuesta por la economía circular y sostenibilidad

Valorization of sludge from drinking water treatment plants.
A commitment to circular economy and sustainability



Juan-José Argudo-García¹, Valentín Molina-Moreno², Juan-Carlos Leyva-Díaz³

¹ SOMAJASA. Sociedad Mixta del Agua Jaén S.A. Calle Santa María, 40 bajo - 23320 Torreperogil (Jaén). Tfno: +34 953 77 83 71.

² Universidad de Granada. Departamento de Organización de Empresas. Campus Universitario de Cartuja, s/n - 18071 Granada. Tfno: +34 958 249598.

³ Universidad de Granada. Departamento de Ingeniería Civil. Campus Universitario de Fuentenueva, s/n - 18071 Granada.

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8024> | Recibido: 11/04/2016 • Aceptado: 03/05/2016

ABSTRACT

- Waste products are generated in a Drinking Water Treatment Plant (DWTP) such as the sludge coming from, mainly, the phases of settling and filtration. Currently, this is becoming increasingly difficult due to the high volume produced and the shortage of disposal options. The objective of the present article is to incorporate the concepts of circular economy and technological nutrient in the valorization of the sewage sludge that is generated in a DWTP. In light of this, it is expected to give answer to the European Directive about circular economy, since the limited availability of suitable agricultural land for sludge application, as well as the risks of pollution of surrounding surface water and ground water bodies has made it necessary to reduce, and even to avoid, the discharges, including the sludge in the productive process as technological nutrient. This enables to use the sludge as basis for the development of additives in the ceramic industry and the production of cements, as well as to recover a fraction of the coagulant and flocculant to use them in the own process of a DWTP.
- Keywords:** Water, Sludge, Valorization, Technological Nutrient, Circular Economy.

RESUMEN

En una Estación de Tratamiento de Agua Potable (ETAP) se generan residuos como son los lodos procedentes, fundamentalmente, de las etapas de decantación y filtrado. En la actualidad, esto supone un grave problema debido al gran volumen que se produce y a la escasez de ámbitos en los que se pueden disponer. El objetivo del presente artículo es incorporar los conceptos de economía circular y nutriente tecnológico en la valorización de los lodos residuales que se generan en una ETAP. De esta forma, se pretende dar respuesta a la Directiva Europea sobre economía circular, ya que la saturación del territorio en cuanto a la aplicación agrícola del lodo, así como la sensibilidad del mismo en relación a una posible contaminación de las aguas superficiales y subterráneas hace necesario reducir, e incluso evitar, los vertidos, incorporando el lodo en el proceso productivo como nutriente tecnológico. Esto permite utilizar los lodos como base para el desarrollo de aditivos en la industria cerámica y la fabricación de cementos, así como recuperar parte del coagulante y floculante utilizados para su empleo en el propio proceso de una ETAP.

Palabras clave: Agua, Lodo, Valorización, Nutriente Tecnológico, Economía Circular.

1. INTRODUCCIÓN

En el contexto actual y desde el punto de vista económico, el agua se considera como un recurso escaso y limitado lo que conlleva que desde los poderes públicos se deba de plantear cómo debe de hacerse una buena valorización de este recurso biológico desde el punto de vista tanto de su uso como de su posible reutilización después de que el mismo se haya utilizado en un proceso industrial como es el caso del presente trabajo. En este sentido, la ciencia económica plantea un nuevo paradigma al que denomina *Economía Circular*, que promueve que todos los factores de producción que intervienen en un proceso industrial, donde se conviertan *inputs* en *outputs*, deben de tener la consideración de ser reutilizables tanto para el mismo proceso como para otros procesos, no generando ningún tipo de residuo ni externalidades negativas derivadas de los mismos.

El tratamiento de aguas para consumo humano requiere de distintas fases, que van desde el pretratamiento hasta la desinfección final de dichas aguas, de tal manera que se van eliminando las sustancias contaminantes que el agua bruta lleva en suspensión, debido a que el agua bruta destinada a consumo humano se toma mayoritariamente de los embalses o de los ríos, por lo que las bombas de aspiración incorporan gran cantidad de tierra y barro del lecho del río [1]. Además, el aumento de las actividades humanas dentro de las áreas urbanas provoca la contaminación del agua y la degradación de la calidad del agua en ríos y acuíferos [2].

La potabilización de aguas superficiales por medio de tratamientos fisicoquímicos genera un volumen de fango de aproximadamente el 5% del volumen total de agua tratada. El fango producido en una Estación de Tratamiento de Agua Potable (ETAP) procede de la purga del decantador y del lavado de los filtros de arena. En el caso de España, la obtención de agua potable para consumo humano proviene en más del 80% de los casos de la potabilización de aguas superficiales, generándose 120.000 toneladas/año de este residuo en más de doscientas Estaciones de Tratamiento de Agua Potable (ETAPs) [3], que producen $1.35 \cdot 10^9$ m³/año de agua potable [4].

En la actualidad, la gran cantidad de fango producido por las ETAPs y la escasez de ámbitos en los que se puede disponer el mismo provocan un grave problema como consecuencia de la saturación de los suelos en relación a la aplicación agrícola del fango

y a la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas. En este sentido, se hace necesario valorizar dicho residuo de modo que sea convertido en un nutriente tecnológico que pueda ser reincorporado a la cadena de producción, dando respuesta a las directrices europeas sobre economía circular [5]. En este trabajo se analiza la reutilización del fango procedente de una ETAP en la industria cerámica y cementera.

2. POTABILIZACIÓN DEL AGUA Y GENERACIÓN DE LODOS

El proceso de potabilización de las aguas subterráneas, aguas de manantiales, aguas procedentes de ríos y/o embalses consta de un filtrado inicial para retirar los fragmentos sólidos de gran tamaño, realizando una precloración posterior con cloro o hipoclorito para eliminar los microorganismos del agua. A continuación, se lleva a cabo un proceso de coagulación-floculación cuyo objetivo es favorecer que las partículas sólidas precipiten formando flóculos mediante la adición de coagulantes y floculantes. Seguidamente, la corriente de agua se somete a un proceso de decantación en el que se eliminan los flóculos formados y otras partículas presentes en el agua. El agua también pasa por filtros de arena para eliminar las partículas que aún puedan quedar, reduciendo a la vez su turbidez. Finalmente, se realiza una cloración para eliminar los microorganismos más resistentes y para la desinfección de las tuberías de la red de distribución (Fig. 1).

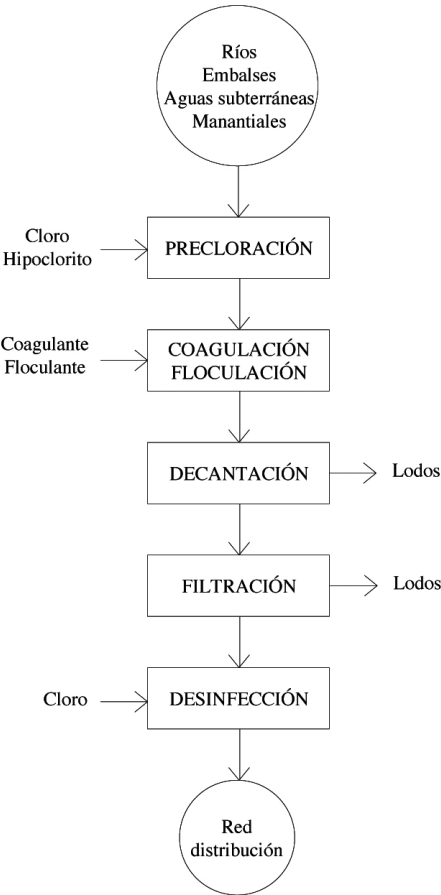


Fig. 1: Diagrama de flujo de una ETAP con tratamiento tipo A2

Una de estas etapas es la decantación, mediante coagulación como fase de desestabilización del coloide, y la posterior de floculación, que no ocurre a la vez, como etapa de agrupamiento de las partículas desestabilizadas en microflóculos y luego en aglomerados más voluminosos llamados flóculos, y con ellos, el agente floculante.

El coagulante más utilizado es el sulfato de aluminio multihidratado, que se disocia en agua y sufre una serie de reacciones con los iones alcalinos presentes en solución acuosa, formando iones complejos que pueden ser adheridos sobre las partículas coloidales suspendidas en el agua produciendo la desestabilización de las cargas y favoreciendo la sedimentación [6]. También se usan los coadyuvantes de coagulación en el proceso de floculación, como por ejemplo los derivados del almidón.

Desde la aparición del RD 140/2003, de 7 de febrero, donde se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano, y la Orden SCO/3719/2005, de 21 de noviembre (ya derogada), se regulan las sustancias para el tratamiento de agua destinada a la producción de agua de consumo humano. Se dejaron de usar los polímeros orgánicos de síntesis a base de poliácridamidas debido a que las dosis permitidas eran demasiado bajas para conseguir resultados eficaces en las ETAPs mediante procesos fisicoquímicos habituales [7].

El problema radicó en que se desconocía el nivel de migración de los polímeros al agua, de tal manera que al no tener la certeza de si producían reacción con el agua, se prohibió el uso de dichas poliacrilamidas, y en su lugar se emplean almidones modificados, como establece la Orden SSI/304/2013, de 19 de febrero, en su anexo I.

La descarga de residuos de una ETAP en las corrientes naturales de agua puede plantear problemas importantes, puesto que en estas instalaciones sólo se gestionaba la producción de agua potable durante 24 horas, sin preocuparse en exceso de los lodos que se generan tanto en la decantación como en el lavado de filtros (Fig. 1) [8], pudiendo ocasionarse los denominados depósitos o "bancos de lodos". En la Tabla 1 se muestra, a modo de ejemplo, la producción de lodos en una ETAP del Canal de Isabel II de Madrid.

En relación al documento "Hacia una Economía Circular: un programa de cero residuos para Europa" [9], este aborda el concepto de la economía circular como aquella ciencia social que se preocupa de los recursos actuales sin provocar externalidades negativas y valora el residuo como un nuevo recurso, como un nutriente tecnológico (concepto de los doctores Molina-Moreno y Leyva-Díaz, de la Universidad de Granada). Según afirman los autores Argudo-García, Molina-Moreno y Leyva-Díaz, se puede considerar la economía circular como una ciencia social que estudia la asignación eficaz y eficiente en términos de sostenibilidad de los factores productivos generando un proceso de producción o prestación de servicios que no conlleva la existencia de externalidades negativas para el ecosistema. De este modo, se reduce la cantidad de materiales necesarios para la prestación de un servicio y se prolonga la vida útil de los productos (durabilidad). Se hace necesario, por tanto, desarrollar los procesos productivos en consonancia a las líneas que marca la economía circular. En el caso de una ETAP, los lodos generados desde el punto de vista económico constituyen una externalidad negativa de un proceso industrial donde el agua como nutriente biológico se convierte en un residuo con alta potencialidad negativa hacia el medio ambiente. Esta po-

Caudal de tratamiento		Purga Decantadores		Lavado filtros		Mezcla	
Caudal agua tratada (m³/s)	Volumen (m³/día)	Concentración lodo (Kg/m³)		Volumen (m³/día)	Concentración lodo (Kg/m³)	Volumen (m³/día)	Concentración lodo (Kg/m³)
1	276	4,5		1680	0,25	1956	0,849

Tabla 1: Lodos producidos en una ETAP del Canal de Isabel II (modificado de Ramírez Quirós [8])

tencialidad puede ser aprovechada mediante la instalación de una planta de tratamiento de lodos del agua potable, no muy complejas en su proceso [8], que conviertan ese residuo en un nutriente tecnológico reutilizable.

3. VALORIZACIÓN DE LODOS PROCEDENTES DE UNA ETAP

Entre las diferentes opciones de utilización de los lodos producidos en una ETAP, se pueden destacar las siguientes [4]:

- Envío de los fangos a vertedero controlado después de su deshidratación (60-70% de humedad).
- Aplicación en suelos agrícolas o forestales.
- Reutilización de los fangos para la fabricación de materiales cerámicos y aditivos de cementos en la industria cerámica y en el sector de la construcción.
- Recuperación de compuestos aluminosos y almidón para reutilizarse como agentes coagulantes y floculantes en el tratamiento de aguas.

Generalmente, estos lodos deshidratados se han enviado a vertedero o se han aplicado en suelos agrícolas o forestales [10,11,12], aunque debido a sus propiedades inertes, y no tóxicas, se podrían usar también en rellenos de terrenos y canteras ya explotadas, o compostaje junto a fangos procedentes de depuración de aguas residuales [8]. Dado el gran volumen de lodos generados en las ETAPs y la tendencia a reducir la generación de residuos, convirtiendo a estos en nutrientes tecnológicos que se reincorporen al ciclo de producción, varios estudios han analizado diferentes alternativas para valorizar dichos lodos. Entre las mismas, resultan de especial interés la reutilización de los lodos para la fabricación de materiales cerámicos y aditivos de cementos, así como la recuperación de compuestos aluminosos y almidón para reutilizarse en la etapa de coagulación-floculación de una ETAP.

El primer paso para la valorización de los lodos generados sería la caracterización de los mismos, para lo cual se suelen usar algunas normas como las citadas a continuación:

- UNE-EN 14701-4. Caracterización de lodos. Propiedades de filtración. Determinación de la capacidad de drenaje de lodos floculados.
- UNE-EN 14701-2:2013. Caracterización de lodos. Propiedades de filtración. Determinación de la resistencia específica a la filtración.
- UNE-EN 14702-2:2007. Caracterización de lodos. Propiedades de sedimentación. Determinación de la aptitud para el espesado.
- UNE-CEN/TR 15473:2008-IN. Caracterización de lodos. Buenas prácticas para el secado de lodos.

Asimismo, habría que tener en cuenta la normativa de la Unión Europea sobre eliminación de residuos y su aplicabilidad a corto plazo [13].

Ramírez Quirós [8] establece un tratamiento para la reutilización de los fangos en las industrias cerámica y cementera, que permiten obtener aditivos de cemento, ladrillos, cerámica, etc. El proceso es fácil de implementar y los productos fáciles de comercializar ya que el lodo suele contener los principales componentes de arcillas, usadas para elaborar productos cerámicos, que incluyen óxidos de aluminio, sílice y hierro [14]. Dicho tratamiento de los lodos consta de las siguientes etapas [8]:

1. Mezcla de distintos lodos, procedentes de decantación mediante purga y de filtrado.

2. Espesamiento de lodos poco concentrados, que va desde 0,2 g/L a 0,5 g/L de materia seca, de filtrado o de decantación, respectivamente. Puede ser por gravedad o flotación.
3. Deshidratación, para conseguir valores de un 20% de sequedad de la materia, se somete a filtración o centrifugación el lodo previamente espesado.

Como antecedentes de esta opción de aprovechamiento se pueden mencionar a Dillion et al. [15], que mostraron el potencial resultante al incorporar lodos provenientes de coagulación con sales de aluminio y sales férricas en varios procesos de fabricación de cemento, ladrillos, hierro y acero, cerámica y materiales refractarios en el Reino Unido. En este sentido, el lodo deshidratado podría emplearse como aditivo en la industria cerámica [1]. Gonçalves, et al. [16] presentaron un estudio sobre la incorporación de lodos de una ETAP en Portugal, como aditivo en la elaboración de mortero, encontrando que el lodo deshidratado y secado a 105°C inhibía el proceso de secado y endurecimiento de la pasta del mortero, por lo que concluyeron que el lodo tratado térmicamente a no menos de 450°C es la mejor opción para fabricar mortero, mejorando el tiempo de secado, pero disminuyendo un poco la resistencia mecánica.

Además, los lodos deshidratados y sometidos a procesos de cocido y las cenizas generadas en la combustión de dichos lodos se pueden usar con distintos aditivos, después del tratamiento térmico, en diferentes productos cerámicos [17,18]. Hernández et al. [19] estudiaron el aprovechamiento de lodos aluminosos generados en una ETAP mediante su incorporación en la fabricación de ladrillos cerámicos. En cuanto a lodos con alto contenido en almidón, estos se pueden utilizar como aglutinantes y formadores de poros en la fabricación de cerámicas porosas [20]. En esta línea, los lodos pueden ser usados como aditivos para producir cerámica refractaria con alto contenido en alúmina, conglomerado de peso ligero, cerámica vítrea y como materia prima para la fabricación de *clinker* [21,22,23,24]. El fango producido también puede ser un sustituto potencial para la arcilla de los ladrillos porque su composición química es muy similar [25].

Los lodos procedentes de una ETAP también se usan en la industria de la construcción, considerándose una opción económica y medioambientalmente aceptable [26]. Cerdeño del Castillo y Pérez Lorenzo [27] estudiaron la fabricación de materiales cerámicos para la construcción a partir del fango generado en una ETAP. Alleman y Berman [28] demostraron que la arcilla convencional podía ser parcialmente complementada con fango para la fabricación de ladrillos. Según Pereira et al. [29], esto puede reducir el coste de fabricación debido a la utilización de un residuo como es el lodo y, al mismo tiempo, puede ayudar a resolver un problema medioambiental. Por lo tanto, la utilización de fango procedente de una ETAP en la fabricación de ladrillos elimina un problema medioambiental, se genera un ahorro económico relacionado con la sustitución parcial de un material natural como la arcilla, siendo estas prácticas amigables con el medio ambiente [30]. Según Elías Castells [1], en el sector de la construcción el lodo puede ser aprovechado en la fabricación de cementos Portland y *clinker*, y en la producción de ladrillos cerámicos, como reemplazo parcial de uno de los materiales, que provoca reducción de la contaminación hídrica, menor gasto de energía, menor uso de utilización de recursos naturales, aumentando la vida útil de las canteras [31]. En consecuencia, se puede concluir que la utilización de fango procedente de una ETAP en la industria de los productos de construcción es una alternativa prometedora y económicamente razonable, y los productos producidos no están contaminados con impurezas peligrosas [32].

Husillos Rodríguez [5] analizó el proceso de secado mediante atomizador de fangos procedentes de una ETAP. Dicho tratamiento produce un material pulverulento de fácil manejo, cuyo tamaño de partícula y forma redondeada son parecidos al del cemento Portland comercial. El fango atomizado puede ser usado como materia prima para la elaboración de crudos de cemento, en sustitución parcial o total de la arcilla ya que la aptitud a la cocción del crudo elaborado con dicho lodo de ETAP es buena y los clínkeres obtenidos a partir del mismo son similares a los tomados como referencia.

Respecto al agua clarificada resultante del tratamiento de lodos, se puede recuperar y enviar al proceso de depuración de la ETAP [8] o bien usarse con otros fines o aprovechamientos, de modo que se genere un ahorro en el consumo de agua.

Por otro lado, los lodos que se generan en las etapas de decantación y filtrado se podrían aprovechar para recuperar una fracción del coagulante (compuestos aluminosos) y del polímero usado como floculante (almidón) para reutilizarlos en dicho tratamiento de agua para consumo humano, con el consiguiente ahorro en el empleo de materias primas. En concreto, la alúmina puede recuperarse de los lodos en forma de sulfatos mediante acidificación a pH 3.3–3.4 con ácido sulfúrico concentrado, para usarla de nuevo en el tratamiento. Esta recuperación puede alcanzar un 54 % del peso de sulfato de aluminio comercial empleado [33]. La separación del floculante del lodo se puede llevar a cabo mediante máquina rotativa de alta velocidad y de alta eficiencia energética. Puede funcionar mucho tiempo con bajas vibraciones como consecuencia de su preciso equilibrio dinámico. El separador de almidón bombea líquido claro por la bomba centrípeta y descarga líquidos de concentración (almidón recuperado) a través de sus boquillas. Estas máquinas rotativas van incorporadas en las plantas de tratamiento de lodos. En lo que se refiere al coste energético, el balance energético de una planta de tratamiento de lodos, una vez que se extrae el almidón como se ha comentado, es positivo si tenemos en cuenta que los lodos secos pueden ser usados como combustible seco y que la cantidad generada de los mismos es elevada [34]. En concreto, un lodo con un 10% de humedad permitiría tener valores de poder calorífico inferior de 2456 kcal/kg [35]. Por lo tanto, la viabilidad energética de los lodos tras el secado mecánico y térmico hace que la recuperación de energía tras la incineración compense el consumo de energía de la extracción de almidón.

En relación al almidón industrial, este procede fundamentalmente de la yuca y del maíz y, como material complejo y valioso, depende del suministro de estos cereales, por su competencia con el maíz para alimento de animales y componentes alimenticios [36]. La fuente de almidón de origen natural está en dos cereales; uno primario como la yuca y un cereal secundario muy importante como es el maíz. La producción mundial de yuca en 2014 se previó en unos 291 millones de toneladas, un aumento de 4,6% respecto al año anterior, ocasionada por la demanda de alimentos de todo el continente africano y por las crecientes aplicaciones industriales de la yuca en Asia oriental y sudoriental, en forma de etanol y de almidón. Y las perspectivas para el año 2015 son de un aumento constante de la producción sobre todo en África, donde es un cultivo estratégico para la seguridad alimentaria y para mitigar la pobreza. La Fig. 2 muestra los precios internacionales de la yuca en el periodo comprendido entre los años 2010 y 2013.

En cuanto al maíz la previsión era de 1018 millones de toneladas para 2014, un 0,7% superior al año 2013, un año con un valor sin precedentes por las cosechas excepcionales en EE.UU y en China [37]. Los datos de producción, utilización y existencias

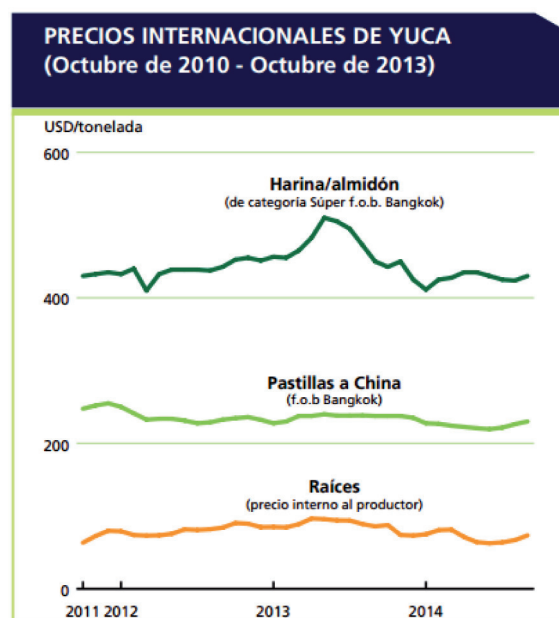


Fig. 2: Precios internacionales de la yuca [37]



Fig. 3: Producción, utilización y existencias de cereales secundarios, entre ellos el maíz [37]

de cereales secundarios, entre los cuales se encuentra el maíz, se muestran en la Fig. 3.

Por lo tanto, el aprovechamiento de los lodos generados debe de conducir a minimizar las necesidades de dicha fuente de almidón.

En este sentido, la valorización de los lodos generados en una ETAP va en consonancia con el concepto de economía circular, analizado anteriormente. Según Antoine Frérot en el boletín de *Robert Schumann Foundation*: "Frente al agotamiento gradual de los recursos vitales para el funcionamiento de las economías modernas, la economía circular ofrece soluciones pragmáticas y eficaces. Al cerrar los ciclos de la materia, el agua y la energía, esta economía diferente hace posible que la economía crezca, al tiempo que permite reducir las extracciones del medio natural" [38].

Igualmente, Biswas [39] nos indica que una nueva mentalidad es necesaria para identificar cuáles son los problemas relacionados con la gestión del agua e implementar soluciones apropiadas, como las recopiladas en este artículo.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se aborda la filosofía y conceptos de lo que se denomina economía circular y nutriente tecnológico, aplicados a la valorización de lodos en las plantas de tratamiento de agua potable que permitan la inclusión de los mismos como materia prima en nuevos procesos industriales, como en los casos de las industrias cerámica y cementera. Desde este punto de vista, los lodos procedentes de las etapas de decantación y lavado de filtros de una potabilizadora pueden ser tratados mediante un proceso combinado de mezcla, espesamiento y deshidratación que permiten la obtención de un producto con importante valor añadido que se puede reutilizar como aditivo en la industria cerámica, para la producción de ladrillos cerámicos, y en la fabricación de cementos *Portland* y *clinker*, lo que conlleva que los mismos pasen de ser considerados como residuos desde el punto de vista de la economía ortodoxa a considerarse como nutrientes tecnológicos desde el punto de vista de la economía circular.

Además, un aspecto importante que ha de ser considerado en el tratamiento del fango generado en una ETAP es la posibilidad de recuperar parte del coagulante y floculante utilizados, lo que conllevaría un ahorro de materias primas, energía y una minimización del impacto ambiental de dicho proceso con una importante preservación de espacios naturales en relación con su destino final en vertedero.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Elías Castells X. Reciclaje de Residuos Industriales. Ediciones Díaz de Santos, 2009. ISBN: 978-84-797-8835-3.
- [2] Hjorth P, Thi Dan N. "Environmentally sound urban water management in developing countries: A case of study of Hanoi". International Journal of Water Resources Development. 2007. Vol.9. p.453-464. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/07900629308722601>
- [3] Contreras F, Gómez J. "Gestión de los fangos generados en las ETAP's. Aspectos medioambientales, legales y técnicos". AEAS-Granada. 2000.
- [4] Armenter JL, Cristiá J, Cusidó JA, et al. "Innovación en el tratamiento de fangos de una ETAP. Secado por atomización y aprovechamiento en la industria cerámica". Tecnología del Agua. 2002.
- [5] Husillos Rodríguez N. "Valorización de residuos de estaciones de tratamiento de agua potable y residual en la industria del cemento". Tesis Doctoral. 2012. Instituto de Ciencias de la Construcción "Eduardo Torroja" (CSIC). Universidad Autónoma de Madrid. Madrid.
- [6] Solís Silvan R, Laines Canepa JR, Hernández Barajas JR. "Mezcla con potencial coagulante para clarificar aguas superficiales". Revista Internacional de Contaminación Ambiental. 2012. Vol.28. p.229-236.
- [7] Guerrero L, Moreno C, Sanz J. "Nuevo proceso físico-químico para la potabilización de agua sin la utilización de poliacrilamidas". Revista InfoEnviro: Actualidad y Tecnología de la Industria Medioambiental. 2005. Vol.38. p.79-82.
- [8] Ramírez Quirós F. "Lodos producidos en el tratamiento del agua potable". Revista Técnica Industrial. 2008. Vol.275. p.46-52.
- [9] Comisión Europea. Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité de las Regiones, Hacia una Economía Circular: Un programa de cero residuos para Europa [en línea]. [ref. de 2 julio 2014]. Disponible en World Wide Web: <http://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:50edd1fd-01ec-11e4-831f-01aa75ed71a1.0009.02/DOC_2&format=PDF>.
- [10] Elliot HA, Dempsey BA, Maille PJ. "Contents and fractionation of heavy metals in water treatment sludges". Journal of Environmental Quality. 1990. Vol.19. p.330-334. DOI: <http://dx.doi.org/10.2134/jeq1990.00472425001900020021x>.
- [11] Roy M, Couillard D. "Metal leaching following sludge application to a deciduous forest soil". Water Research. 1998. Vol.32. p.1642-1652. DOI: [10.1016/S0043-1354\(97\)00375-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1354(97)00375-8).
- [12] Basta NT. "Examples and case studies of beneficial re-use of municipal by-products". In: Power JF and Dick WA (eds.). Land Application of Agricultural, Industrial and Municipal By-Products. 2000. ASA, CSSA and SSSA. Madison. WI. 492-504.
- [13] Unión Europea. Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre de 2008, sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas. Diario Oficial de la Unión Europea, 22 de noviembre de 2008, núm. 312.
- [14] Ramírez Zamora RM, Espesal Ayala F, Chavez García L, et al. "Optimization of the preparation conditions of ceramic products using drinking water treatment sludges". Journal of Environmental Science and Health Part A. 2008. Vol.43. p.1562-1568. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/10934520802293750>.

- [15] Dillion GR, Hall T, Sweet N, et al. "Novel methods for the treatment and disposal of waterworks sludge: Final report". WRc Report No. PT1084. 1996.
- [16] Goncalves A, Esteves A, Carvalho M. "Incorporation of Sludges from a Water Treatment Plant in Cement Mortars". En: The Conference Use of Recycled Materials in Building and Structures. 2004. Barcelona (España).
- [17] Merino I, Arévalo LF, Romero F. "Preparation and characterization of ceramic products by thermal treatment of sewage sludge ashes mixed with different additives". Waste Management. 2007. Vol.27. p.1829-1844. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2006.10.008>
- [18] Monteiro SN, Alexandre J, Margen JJ, et al. "Incorporation of sludge waste from water treatment into red ceramic". Construction and Building Materials. 2008. Vol.22. p.1281-1287. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.01.013>
- [19] Hernández D, Villegas JD, Castaño JM. "Aprovechamiento de lodos aluminosos generados en sistemas de potabilización, mediante su incorporación como agregado en materiales de construcción". Revista Ingenierías. 2006. Vol.5, núm. 8.
- [20] Pacheco Flores A. "Exploración de las condiciones óptimas de producción de cerámicos celulares mediante el reciclado de lodos de potabilización de agua". Tesis. 2012. Universidad Nacional Autónoma de México.
- [21] Ferreira JMF, Olhero SM. "Al-rich sludge treatments towards recycling". Journal of the European Ceramic Society. 2002. Vol.22. p.2243-2249. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0955-2219\(02\)00023-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0955-2219(02)00023-7).
- [22] Toya T, Nakamura A, Kameshima Y, et al. "Glass-ceramics prepared from sludge generated by a water purification plant". Ceramics International. 2007. Vol.33. p.573-577. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2005.11.009>
- [23] Husillos Rodríguez N, Martínez-Ramírez S, Blanco-Varela MT, et al. "Evaluation of spray-dried sludge from drinking water treatment plants as a prime material for clinker manufacture". Cement & Concrete Composites. 2011. Vol.33. p.267-275. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.10.020>
- [24] Huang C-H, Wang S-Y. "Application of water treatment sludge in the manufacturing of lightweight aggregate". Construction and Building Materials. 2013. Vol.43. p.174-183. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.016>
- [25] Hegazy BE, Fouad HA, Hassanain AM. "Incorporation of water sludge, silica fume, and rice husk ash in brick making". Advances in Environmental Research. 2012. Vol.1. p.83-96. DOI: <http://dx.doi.org/10.12989/aer.2012.1.1.083>
- [26] Ramadan MO, Fouad HA, Hassanain AM. "Reuse of water treatment plant sludge in brick manufacturing". Journal of Applied Sciences Research. 2008. Vol.4. p.1223-1229.
- [27] Cerdeño del Castillo FJ, Pérez Lorenzo A. "Viabilidad técnica de uso de lodos de Estaciones de Tratamiento de Aguas Potables (ETAP) en fabricación de materiales cerámicos para la construcción". Conarquitectura. 2006, núm. 30.
- [28] Alleman J, Berman N. "Constructive sludge management: biobrick". Journal of Environmental Engineering. 1984. Vol.110. p.301-311. DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(1984\)110:2\(301\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(1984)110:2(301))
- [29] Pereira DA, Couto DM, Labrincha JA. 2000. "Incorporation of alumina rich residues in refractory bricks". CFI-Ceramic Forum International. 2000. Vol.77. p.21-25.
- [30] Beretka J. "The utilisation of industrial wastes and by-products in the ceramic industry". Journal of the Australian Ceramic Society. 1975. Vol.11. p.25-29.
- [31] Torres P, Hernández D, Paredes D. "Uso productivo de lodos de plantas de tratamiento de agua potable en la fabricación de ladrillos cerámicos". Revista Ingeniería de Construcción. 2012. Vol.27. p.145-154. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732012000300003>
- [32] Liew AG, Idris A, Wong CHK, et al. "Incorporation of sewage sludge in clay brick and its characterization". Waste Management & Research. 2004. Vol.22. p.226-233. DOI: <http://dx.doi.org/10.1177/0734242X04044989>
- [33] VV.AA. Manual técnico del agua (3ª ed. española). Editorial Degrémont, 1973.
- [34] Grau A, Farré O. Situación y potencial de valorización energética directa de residuos. Estudio Técnico PER 2011-2020. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. Plan de Energías Renovables (PER) en España 2011-2020.
- [35] Colomer Mendoza FJ, Carlos Alberola M, Herrera Prats L, et al. "Viabilidad de la valorización energética de lodos procedentes de distintos tipos de depuradoras". Residuos. 2009. Vol.110. p.32-37.
- [36] Casey JP. Pulpa y Papel (Química y Tecnología Química Vol. 1). Editorial Limusa, 1991. ISBN: 978-96-818-2061-9.
- [37] 2014 Perspectivas alimentarias. Resúmenes de Mercado: FAO, 2014. ISSN 1564-2798.
- [38] Frérot A. "Economía circular y eficacia en el uso de los recursos: un motor de crecimiento económico para Europa". Boletín Cuestión de Europa. Robert Schuman Foundation. 2014. Núm. 331.
- [39] Biswas AK. "Water Management: some personal reflections". Water International. 2009. Vol.34. p.402-408. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/02508060903396189>

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha contado con el apoyo y financiación de los proyectos del Ministerio de Economía y Competitividad ECO2010-15885 y ECO2013-47027-P, Junta de Andalucía P11-SEJ-7294 y Unión Europea (Fondos FEDER).