

**ESTUDIO DEL USO DE LOS LODOS GENERADOS EN SISTEMAS DE  
TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE Y RESIDUAL**

**ADRIANA JOYA PRADA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE CIENCIAS  
ESCUELA DE QUÍMICA  
ESPECIALIZACIÓN EN QUÍMICA AMBIENTAL  
BUCARAMANGA**

**2014**

**ESTUDIO DEL USO DE LOS LODOS GENERADOS EN SISTEMAS DE  
TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE Y RESIDUAL**

**ADRIANA JOYA PRADA**

**Ingeniera Química**

**Trabajo de Grado para optar al título de Especialista en Química  
Ambiental**

**Director**

**MARIANNY YAJAIRA COMBARIZA MONTAÑEZ**

Química Dr.Sc.

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**ESCUELA DE QUÍMICA**

**ESPECIALIZACIÓN EN QUÍMICA AMBIENTAL**

**BUCARAMANGA**

**2014**

***A Dios quien fue el inspirador de realizar está especialización:  
“Y sobre todo, ¿quién podrá conocer tus designios o tu voluntad, si tú no  
le das sabiduría, y no envías desde lo más alto de los cielos tu santo  
Espíritu”. Sabiduría 9, 17.***

***A mi madre por todo su amor, su compañía y apoyo constante.***

***A mis abuelos y familia a quienes amo con toda mi alma.***

## **AGRADECIMIENTOS**

*A Dios por permitirme realizar y llevar a feliz término este post grado.*

*A mi madre por su amor y apoyo incondicional.*

*A mis familiares y amigos por su constante apoyo, compañía y motivación.*

*A los profesores de la Especialización en Química Ambiental por aportar sus experiencias, dedicación y valiosas enseñanzas en el transcurso de mi paso por la especialización.*

*A la Dra. Sc. Mariani Yajaira Combariza, por brindarme la oportunidad de realizar este trabajo de grado, su colaboración y paciencia para la finalización del mismo.*

*A Elizabeth por su desinteresada colaboración.*

*A la Universidad Industrial de Santander por la formación académica.*

## TABLA DE CONTENIDO

	Pág
<b>INTRODUCCION</b>	19
<b>1. BIBLIOMETRÍA</b>	22
<b>2. ASPECTOS GENERALES</b>	28
<b>3. FORMACIÓN DE LODOS EN UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE</b>	30
3.1. CARACTERISTICAS Y COMPOSICION	30
3.2. TOXICIDAD	32
<b>4. FORMACIÓN DE LODOS EN UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL</b>	35
4.1. CARACTERISTICAS Y COMPOSICION	35
4.2. TOXICIDAD	40
4.3. MANEJO Y DISPOSICION DE LOS LODOS GENERADOS DEL TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL	42
<b>5. REUTILIZACIÓN DE LODOS GENERADOS EN SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE Y RESIDUAL</b>	45
5.1 USO DE LODOS PROVENIENTES DE UN PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE	45
5.1.1. Uso de los lodos del tratamiento de agua potable en los procesos de tratamiento de agua residual	45
5.1.1.1. Recuperación y reutilización del coagulante	45
5.1.1.2. Uso directo del lodo generado del tratamiento de agua potable como coagulante y floculante en el tratamiento de aguas residuales	48
5.1.1.3. Uso de los lodos generados del tratamiento de agua potable como adsorbente para contaminantes y metales en las aguas residuales.	50
5.1.1.4. Uso de los lodos generados del tratamiento de agua potable como Co-acondicionados y deshidratador	51
5.1.1.5. Uso en la Construcción de humedales artificiales	52
5.1.2. Uso como material de construcción y de la construcción	53

5.1.2.1.	Fabricación de ladrillos	53
5.1.2.2.	Fabricación de cemento y materiales de cemento	55
5.1.2.3.	El uso en pavimento y obras geotécnicas	56
5.1.3.	Aplicaciones en tierra	57
5.1.3.1.	Lodos de aguas ablandadas para ajuste de pH	57
5.1.3.2.	Para la mejora estructural del suelo	58
5.1.3.3.	Como tampón de los suelos	60
5.1.3.4.	Reducción de nutrientes en los suelos cargados y escorrentías	60
<b>5.2.</b>	<b>USO DE LOS LODOS PROVENIENTES DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL</b>	<b>62</b>
5.2.1.	Aprovechamiento térmico	63
5.2.1.1.	Co-Combustión	64
5.2.1.2.	Oxidación húmeda.	65
5.2.1.3.	Pirolisis	66
5.2.1.3.1.	Adsorbentes alcalinos a partir de lodos generados del tratamiento de aguas residuales	67
5.2.1.4	Gasificación	69
5.2.1.4.1.	Producción de hidrogeno a partir de los lodos generados del tratamiento de agua residual	71
5.2.1.5.	Uso de lodos generados en el tratamiento de aguas residuales en la elaboración de cemento y ladrillo	72
5.2.1.5.1.	Co-combustión de lodos generados en el tratamiento de aguas residuales, para la fabricación de cemento	72
5.2.1.5.2.	Uso de los lodos generados en el tratamiento de aguas residuales en la producción de cemento y ladrillo	73
5.2.2.	Uso de los lodos generados en el tratamiento de aguas residuales para acondicionamiento del suelo	75
5.2.3	Producción biológica de hidrogeno	76
	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>79</b>
	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS</b>	<b>82</b>

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Cobertura de acueducto y alcantarillado, Censo 2005.	20
Tabla 2. Estado de los Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales.	20
Tabla 3. Composición típica de LTAP (valores medios + SD) derivados.	31
Tabla 4. Características y cantidades de lodo típicas.	36
Tabla 5. Producción anual de lodos de PTAR, en 25 estados miembros de la Unión Europea.	37
Tabla 6. Composición química típica y propiedades de los lodos primarios no tratados / digerido y secundarios.	38
Tabla 7. Restricciones sobre la gestión de los lodos basado en principio de sostenibilidad.	39
Tabla 8. Valores caloríficos típicos para varios tipos de lodos de depuradora.	40
Tabla 9. Contenido típico de metales en los lodos de aguas residuales.	41
Tabla 10. Rangos de temperatura para diferentes sustancias a descomponer.	67
Tabla 11. Composición típica combustible gas procedente de la gasificación (% vol).	70

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Evolución de los últimos 15 años según Science Direct de tecnologías encontradas y aplicadas a lodos generados por una PTAP.	22
Figura 2. Tipo de literatura científica encontrada en la base de datos Science Direct en los últimos 15 años relacionados con los lodos provenientes de las PTAP`s.	23
Figura 3. Evolución de los últimos 15 años según Scopus de tecnologías encontradas y aplicadas a lodos generados por una PTAP.	23
Figura 4. Tipo de documentos encontrados en la base de datos Scopus en los últimos 15 años relacionados con los lodos provenientes de las PTAP`s.	24
Figura 5. Síntesis de la literatura científica encontrada sobre aplicaciones y nuevas tecnologías para lodos generados en PTAR`s.	24
Figura 6. Evolución de los últimos 15 años según Science Direct de tecnologías encontradas y aplicadas a lodos generados por una PTAR.	25
Figura 7. Literatura científica encontrada en Science Direct en los últimos 15 años relacionados con los lodos provenientes de las PTAR.	25
Figura 8. Evolución de los últimos 15 años según Scopus de tecnologías encontradas y aplicadas a lodos generados por PTAR.	26
Figura 9. Literatura científica encontrada en la base de datos Scopus en los últimos 15 años relacionados con los lodos provenientes de las PTAR.	26
Figura 10. Compilación de la literatura científica encontrada sobre aplicaciones y nuevas tecnologías para los lodos generados en PTAR.	27
Figura 11. (a) flóculos y agua; (b) esqueleto del floc y agua intersticial.	32
Figura 12. Procesos aplicados en cada etapa de tratamiento de lodos residuales para su disposición final.	43
Figura 13. Usos de lodos residuales con base en su origen y los productos obtenidos de diversos procesos.	63

## LISTA DE ABREVIATURAS

ANDESCO	Asociación Nacional de Empresas de Servicios públicos y Comunicaciones.
BESA.	Ácido 2-bromoethanesulfonic.
BMP.	Biosolids Mangement Program.
CAG-	Carbón Activado Granular Proveniente de la Pirólisis de Lodos
PPLR.	Residuales.
CRA.	Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico.
DANE.	Departamento administrativo Nacional de Estadísticas.
DBO <sub>5</sub> .	Demanda Biológica de Oxígeno.
DQO.	Demanda Química de Oxígeno.
LTAP.	Lodos del Tratamiento de Agua Potable.
LTAR.	Lodos del Tratamiento de Agua Residual.
MA.	Ministerio de Ambiente.
MAVDT.	Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.
RAS.	Reglamento técnico para el sector de agua potable y saneamiento básico.
RCN.	Radio Cadena Nacional de Televisión de Colombia.
PTAP.	Planta de Tratamiento de Agua Potable.
PTAR.	Planta de Tratamiento de Agua Residual.
SST.	Sólidos Suspendidos Totales.
SD	Desviación Estándar.
OMS.	Organización Mundial de la Salud.
WEF.	Water Environment Federation.

## GLOSARIO

**ÁCIDOS FÚLVICOS:** son el principal componente de los materiales orgánicos presentes en aguas naturales, aunque también están presentes compuestos húmicos e himatomelánicos.

**ACONDICIONAMIENTO:** El lodo residual, se trata con sustancias químicas o calor para que el agua pueda separarse rápidamente.

**ACUEDUCTO:** es un sistema o conjunto de sistemas de irrigación, que permite transportar agua en forma de flujo continuo desde un lugar en el que ésta accesible en la naturaleza, hasta un punto de consumo distante.

**ALCANTARILLADO:** o red de alcantarillado, se denomina al sistema de estructuras y tuberías usados para el transporte de aguas residuales o servidas (alcantarillado sanitario), o aguas de lluvia, (alcantarillado pluvial) desde el lugar en que se generan hasta el sitio en que se vierten a cause o se tratan.

**BIOACUMULACIÓN:** acumulación neta, con el paso del tiempo, de metales (u otras sustancias persistentes) en un organismo a partir de fuentes tanto bióticas (otros organismos) como abióticas (suelo, aire y agua).

**BIOMASA:** cantidad de materia acumulada en un individuo, un nivel trófico, una población o un ecosistema; originada en un proceso biológico, espontáneo o provocado como fuente de energía.

**BIOSÓLIDOS:** Lodos que han sido sometidos a procesos de estabilización y que por su contenido de materia orgánica, nutrientes y características adquiridas después de su estabilización, puedan ser susceptibles de aprovechamiento.

**CHAR:** residuo carbonoso, Procedente de procesos de combustión.

**CLINKER:** es la principal materia prima de la que se obtienen el cemento. Es producto de la fusión de arcilla y caliza.

**COAGULACIÓN:** Consiste en neutralizar la carga, generalmente electronegativa, de los coloides presentes en el agua, quedando estos en condiciones de formar flóculos. Este proceso se consigue introduciendo en el agua un producto químico denominado coagulante.

**CO-COMBUSTIÓN:** procesos predominantes en el mercado para el aprovechamiento de los LTAR, dentro de los más utilizadas se encuentran los hornos de solera y de lecho fluidizado.

**DESHIDRATADO:** Proceso o procesos para separar el agua que acompaña a los lodos.

**DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (DBO):** parámetro indicador de contaminación de un agua, que mide el contenido en el agua de sustancias bioquímicamente degradables.

**DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO):** concentración en mg/L de oxígeno, que es equivalente a la cantidad de un oxidante específico gastado en la digestión de un agua bajo condiciones definidas.

**DIBENZODIOXINAS Y DIBENZOFURANOS:** aparecen como subproducto o impureza durante el tratamiento térmico de compuestos fenólicos o aromáticos en presencia de cloro. Esto puede ocurrir en distintos procesos tecnológicos, como la producción de PCB y plaguicidas organoclorados, en la incineración de compuestos clorados, como ocurre durante la quema de residuos domiciliarios. Puede aparecer en eventos naturales como los incendios forestales. Conocidos como DIOXINAS.

**ENCALADO:** proceso mediante el cual se incorpora calcio y magnesio al suelo para neutralizar la acidez del mismo.

**ESPEZAMIENTO:** consiste en la separación de la mayor cantidad posible de agua por gravedad o flotación.

**ESTABILIZACIÓN:** Proceso de conversión de sólidos orgánicos en formas más estables con el propósito de que puedan manejarse o usarse como acondicionadores de suelo, sin causar daño o peligro a la salud. El proceso puede ser biológico o químico.

**FLOCULACIÓN:** Acumulación de partículas desestabilizadas y micro partículas, y posteriormente la formación de copos de tamaño deseado. Se añade una sustancia química llamada floculante en orden de facilitar la formación de copos llamados flóculos.

**FLOCULOS:** conjunto de materia orgánica o inorgánica formado por agregación de sólidos en suspensión, que se obtiene mediante tratamiento químico, físico o biológico. Puede ocurrir de forma natural, pero es usualmente inducido con el fin de eliminar ciertas partículas del agua residual.

**GASIFICACIÓN:** proceso térmico mediante el cual el contenido carbonoso de los lodos de PTAR se transforma en gas combustible y cenizas bajo una atmósfera reductora neta. Por otra parte, se puede afirmar que los objetivos óptimos de gasificación de lodos de PTAR son la producción de gas limpio combustible a alta eficiencia.

**HELMINTO:** Término designado a un amplio grupo de gusanos parásitos (de humanos, animales y vegetales), de vida libre, con forma y tamaños variados. Poseen órganos diferenciados, y sus ciclos vitales comprenden la producción de huevos o larvas, infecciosas o no.

**HIDROLÍISIS:** La hidrólisis es una reacción química entre agua y otra sustancia, como sales. Esto produce un desplazamiento del equilibrio de disociación del agua y como consecuencia se modifica el valor del pH.

**INCINERACIÓN:** es la combustión completa de la materia orgánica hasta su conversión en cenizas, usada en el tratamiento de basuras. Se lleva a cabo en hornos, mediante oxidación química en exceso de oxígeno.

**LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE:** Valor asignado a un parámetro, el cual no debe ser excedido por los lodos y biosólidos para que puedan ser dispuestos o aprovechados.

**LIXIVIADO:** Líquido proveniente de los lodos y biosólidos, el cual se forma por reacción o percolación y que contiene contaminantes disueltos o en suspensión.

**LODO CRUDO:** Aquellos removidos durante las distintas etapas de tratamiento de aguas y que no han sido objeto de proceso de estabilización. (No aptos para uso agrícola.)

**LODO DESHIDRATADO:** Aquellos sometidos a procesos de secado, logrando un porcentaje de humedad igual o inferior al 70 % por peso.

**LODO ESTABILIZADO:** Aquellos sometidos a procesos de tratamiento para evitar la putrefacción y la atracción de vectores.

**LODO HIGIENIZADO:** Aquellos sometidos a un proceso para eliminar gérmenes patógenos.

**LODOS ACTIVADOS.** Este proceso y sus variantes o modificaciones son los más frecuentemente utilizados en grandes instalaciones. El agua residual previamente sedimentada y el lodo de recirculación se alimentan en la entrada de un tanque de aereación, donde son mezclados por medio de difusores o de aereadores mecánicos para propiciar la degradación de la materia. Tienen eficiencias de 85 al 95 %.

**LODOS:** Son sólidos con un contenido variable de humedad, provenientes del desazolve de los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, de las plantas potabilizadoras y de las plantas de tratamiento de aguas residuales, que no han sido sometidos a procesos de estabilización.

**MEJORAMIENTO DE SUELOS:** Es la aplicación de los biosólidos en terrenos para mejorar sus características físicas, químicas o microbiológicas.

**OXIDACIÓN HÚMEDA:** se lleva a cabo en una fase acuosa a temperaturas de 15-330°C y presiones de 1-22 MPa utilizando oxígeno puro o atmosférico. Se necesita una alta temperatura para evitar la ebullición a las temperaturas requeridas por el proceso (Hall, 1995).

**PIRÓLISIS:** el proceso a través del cual, las sustancias orgánicas se descomponen térmicamente en una atmósfera libre de oxígeno, a temperaturas que varían en el rango de los 300 a 900°C.

**REDUCCIÓN:** Este proceso tiene el propósito de disminuir el volumen de lodo y los sólidos se convierten a formas más estables, como puede ser por tratamientos térmicos como incineración, pirólisis y plasma.

**SEDIMENTACIÓN:** Es el proceso por el cual el material sólido, transportado por una corriente de agua, se deposita en el fondo del río, embalse, canal artificial, o dispositivo construido especialmente para tal fin. Toda corriente de agua, caracterizada por su caudal, tirante de agua, velocidad y forma de la sección tiene una capacidad de transportar material sólido en suspensión. El cambio de alguna de estas características de la corriente puede hacer que el material transportado se sedimente; o el material existente en el fondo o márgenes del cauce sea erosionado.

**SÓLIDOS TOTALES (ST):** Son los materiales residuales que permanecen en los lodos y biosólidos, que han sido deshidratados entre 103 °C a 105 °C, hasta alcanzar un peso constante y son equivalentes en base a peso seco.

**SÓLIDOS VOLÁTILES (SV):** Son sólidos orgánicos totales presentes en los lodos y biosólidos, que se volatilizan cuando éstos se queman a 550 °C en presencia de aire por un tiempo determinado.

## RESUMEN

**TÍTULO:** ESTUDIO DEL USO DE LOS LODOS GENERADOS EN SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE Y RESIDUAL\*

**AUTOR:** Adriana Joya Prada\*\*

**PALABRAS CLAVES:** lodos, agua natural, agua residual, proceso, biosólidos, ladrillo,

### DESCRIPCIÓN

Durante el tratamiento del agua natural y residual se producen desechos o subproductos que deben ser tratados, es el caso de los lodos, que generados en el tratamiento de agua residual, reciben el nombre de “biosólidos” luego de ser estabilizados. El principal problema ambiental consiste en encontrar un destino final que contribuya de manera positiva a la preservación y/o recuperación del medio ambiente (Mo y Zhang, 2013).

Las principales preocupaciones que surgen de utilizar lodos, especialmente los generados del tratamiento de aguas residuales, se relacionan con problemas de salud, olor y aceptación pública (Mo y Zhang, 2013). Para el caso de lodos subproducto de potabilización es necesario tener en cuenta el contenido de metales pesados. En países como EE.UU., los biosólidos se han utilizado como mejorador del suelo. Por ejemplo, en 2004 el 49% de los sólidos de las aguas residuales de Estados Unidos se utilizó para la aplicación al suelo, mientras que el 45% restante se dispuso en rellenos sanitarios, el 6% remanente se almacenó o no se informó sobre su uso final (Nebra, 2007).

En Colombia solo en casos muy esporádicos se han usado los lodos generados del tratamiento de agua, especialmente las residuales, para el mejoramiento de suelos agrícolas por su alto contenido de nutrientes y en algunos casos pruebas piloto sobre uso como materia prima para la fabricación de ladrillo. Sin embargo, no todos los lodos producidos por las plantas de tratamiento de aguas (potables y residuales) encuentran una aplicación útil y la gran mayoría termina como residuo sólido en rellenos sanitarios o en botaderos a cielo abierto. Debido a la problemática expuesta, esta monografía tiene como objetivo realizar un análisis bibliográfico actualizado sobre los usos de los lodos generados tanto en Plantas de Tratamiento de Agua Potable como en Plantas de Tratamiento de Agua Residual.

---

\*Trabajo de grado para optar al título de Especialista en Química Ambiental. Modalidad monografía.

\*\*Facultad de ciencias. Escuela de Química. Especialización en Química Ambiental. Directora: Dr. Sc. Marianny Yajaira Combariza Montañez.

## ABSTRACT

**TITLE: STUDY ON THE USAGE OF SLUDGE GENERATED IN THE TREATING SYSTEMS OF DRINKING AND WASTE WATER \***

**AUTOR: Adriana Joya Prada\*\***

**KEY WORDS:** Sludge, natural water, waste water, process, biosolids, brick.

### DESCRIPTION

During the treatment of natural and waste water, waste or by-products are produced and must be treated as it is the case of the mud generated in the treatment of waste water. After stabilized, this mud receives the name of "biosolids". The main environmental challenge for this biosolids is about finding a final use that positively contributes to the preservation and/or recovery of the environment (Mo and Zhang, 2013)

The main concerns related to use sludge generated from the treatment of waster waters are related to the health problems, odor, and public acceptance (Mo y Zhang, 2013). In the case of mud by-products is necessary to consider the heavy metals content. In countries such as U.S.A, the biosolids have been used as soil enhancer. For instance in 2004, 49% of the solids from waste water in U.S.A was used in soils, 45% was disposed in landfills, and the remaining 6% was stored or its final used was not reported (Nebra, 2007)

In Colombia, the use of mud from water treatment has been sporadic. Sludge from waste water has been used especially for the improvement of farm soil for its high nutrient content and as a raw material to make bricks in pilot tests. However, not all the mud produced from water treatment plants (drinking and waste water) find a useful application and most of them end up in landfills or open dumpsters. Given the challenges previously presented, the objective of this monograph is to create an updated bibliographic analysis about the uses of sludge generated in drinking water treatment plants as well as in waste water treatment plants.

---

\*Research work to earn the degree of Environment Chemist Specialist. Monograph Category.

\*\*College of Science. Department of Chemistry. Specialization in Environmental Chemistry. Advisor: Dr. Sc. Marianny Yajaira Combariza Montañez.

## INTRODUCCIÓN

En 2012 el presidente de la asociación Nacional de Empresas de Servicios Públicos y Comunicaciones (Andesco), afirmó para RCN radio que “solamente el 30% de las aguas residuales en Colombia reciben tratamientos, que no son muy adecuados, falta el 70% y eso implica inversiones muy grandes” (RCN La Radio, 2012). La falta de sistemas de tratamiento de aguas residuales tiene como consecuencia adicional que en Colombia no exista una normatividad específica para regular el uso y destino final de los lodos provenientes de una planta de tratamiento de agua potable (PTAP) y una planta de tratamiento de agua residual (PTAR). Consecuentemente, muchos de estos lodos se disponen inadecuadamente, lo que causa impactos ambientales negativos. Generalmente, en relación con la disposición de lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas, las autoridades ambientales Colombianas siguen las directrices del decreto 4741 de 2005 (artículo 32), que prohíbe el abandono de residuos o desechos.

Las PTAP`s tratan aguas superficiales por medio de procesos de aireación, coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección produciendo agua de muy buena calidad a partir de agua cruda disponible de cualquier fuente, además de residuos que se catalogan como lodos químicos (RAS, 2000). Las PTAR`s tratan aguas servidas provenientes de descargas residuales municipales e industriales mediante procesos fisicoquímicos y/o biológicos, con el fin de eliminar o reducir los contaminantes que por actividad antropogénica o natural se han incorporado en las aguas; estos tratamientos también producen lodos residuales (Decreto 4741, 2005). Vale la pena mencionar que los datos más recientes obtenidos por el censo del Departamento Administrativo Nacional de Estadística -DANE correspondientes al año 2005 según la Tabla 1., muestran que de los 9'742.928 hogares que hay en el país, 8'125.908 (83,4%) cuenta con el servicio de acueducto. Con respecto al alcantarillado, 7'117.781 hogares cuentan con el servicio (73,05%) (Lopera et al., 2012). En estos datos se observa que los procesos de potabilización superan ampliamente los de tratamiento de agua residual.

**Tabla 1. Cobertura de acueducto y alcantarillado, Censo 2005**

DETALE	VIVIENDAS OCUPADAS	ACUEDUCTO		ALCANTARILLADO	
		SI	NO	SI	NO
<b>Total nacional</b>	9.742.928	8.125.908	1.617.020	7.117.781	2.625.147
<b>Cabecera</b>	7.488.833	7.063.971	424.862	6.717.477	771.356
<b>resto</b>	2.254.095	1.061.937	1.192.158	400.304	1.853.791

Fuente: DANE, Censo 2005.

En este contexto es conveniente indicar que si bien hay un número importante de sistemas de tratamiento de aguas residuales (en funcionamiento, implementación o en proceso de construcción) su operación y mantenimiento se convierte en un reto, pues solo el 51% de las PTAR`s construidas funcionan (Tabla 2). Esta situación se debe en parte al desconocimiento, o a la poca importancia que se le da a la operación y mantenimiento de estos sistemas, pues se cree que el problema se soluciona con la construcción de la infraestructura. Otra de las causas de esta situación, es la falta de sostenibilidad financiera de los sistemas, pues el 77% de los casos no ha elaborado un estudio de impacto tarifario y en el 80% de los casos no se han utilizado las metodologías establecidas por la Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico - CRA; esta situación implica que las PTAR`s construidas no tienen garantizada su sostenibilidad (Lopera et al., 2012).

**Tabla 2. Estado de los Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales**

ESTADO	AÑO 2006	
	No.	(%)
<b>Bueno</b>	108	24%
<b>Regular</b>	122	27%
<b>Deficiente</b>	100	22%
<b>No se conoce el estado</b>	124	27%
<b>Total PTAR Construidas</b>	454	100%

Fuente: MAVDT, Inventario realizado por el MVADT en el marco del SINA, 2006.

De la tabla 2. Se puede observar que para el año 2006 había 454 PTAR`s construidas en Colombia, estas a su vez producen gran cantidad de lodos residuales que en su mayoría se destinan a compostaje o se eliminan como residuos peligrosos.

El estudio del re-uso de los lodos generados en las PTAP`s y PTAR`s ha sido ampliamente reportado en la literatura, pero hay deficiencias entre las investigaciones realizadas y el compromiso de los países en desarrollar y aplicar estas tecnologías. En Colombia no se encuentra información estandarizada sobre este tema. Con base en la información recolectada, esta monografía tiene como objetivos identificar y analizar las diferentes tecnologías disponibles en las bases de datos referenciales, relacionadas con el uso de los lodos generados en el tratamiento de aguas residuales y potables.

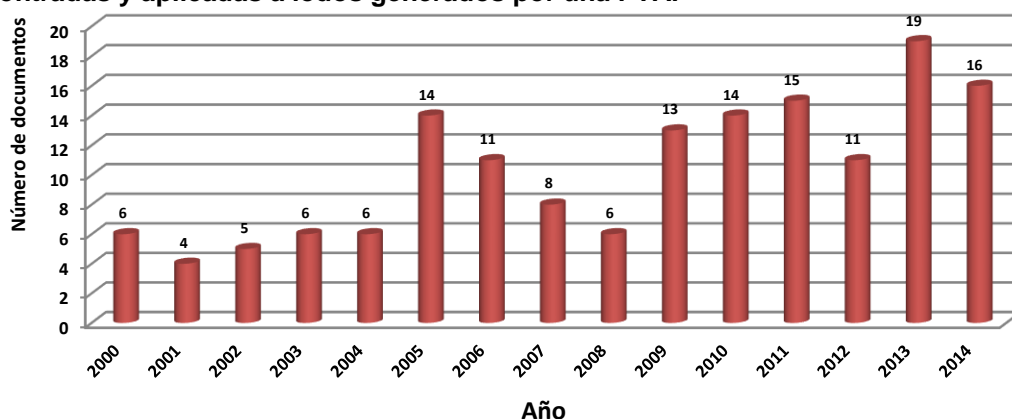
# ESTUDIO DEL USO DE LOS LODOS GENERADOS EN SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE Y RESIDUAL

## 1. BIBLIOMETRÍA

La presente monografía se centra en el análisis de la información relacionada con el uso de los lodos generados en PTAP`s y PTAR`s, existente en las bases de datos de la biblioteca de la Universidad Industrial de Santander como son: Scopus y Science Direct ambos del grupo Elsevier. Adicionalmente, se incluye información suplementaria recopilada por contacto con profesionales que han realizado investigación sobre el tema en Colombia y otros países.

La búsqueda se concentró en publicaciones de la literatura científica de los últimos quince (15) años, relacionadas con el uso de los lodos generados en las PTAP`s y PTAR`s (Figuras 1 a 11). Las palabras claves utilizadas para la búsqueda de información relacionada con los lodos generados por la PTAP fueron: “*utilization*”, “*sludge*”, “*drinking*”, and “*water*”.

Figura 1. Evolución de los últimos 15 años según Science Direct de tecnologías encontradas y aplicadas a lodos generados por una PTAP

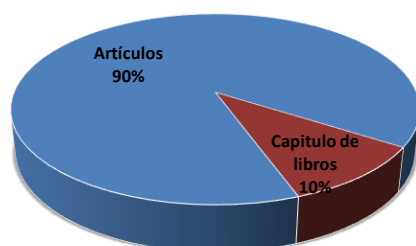


Fuente: Science Direct. <http://www.sciencedirect.com/> (Consultado: Julio 4, 2014)

La información encontrada, utilizando la base de datos Science Direct, sobre usos alternativos de lodos generados en las PTAP`s corresponde a 154 documentos (Figura 1). Como se observa en la figura, la literatura científica

sobre el tema va en aumento y muestra un mayor avance científico en los últimos dos años.

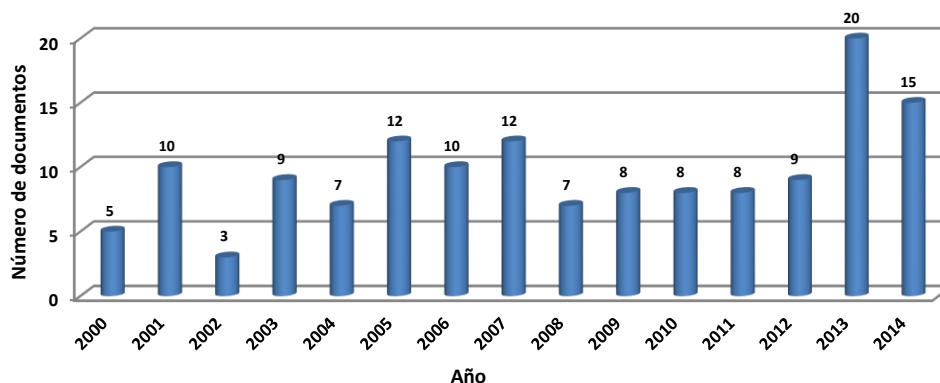
**Figura 2. Tipo de literatura científica encontrada en la base de datos Science Direct en los últimos 15 años relacionados con los lodos provenientes de las PTAP`s.**



Fuente: Science Direct. <http://www.sciencedirect.com/> (Consultado: Julio 4, 2014)

Según la Figura 2, el 90% de los documentos relacionados con la aplicación de los lodos generados en las PTAP`s son artículos y el 10% de está son capítulos de libro, lo cual indica gran actividad investigativa en esta área desde el año 2000.

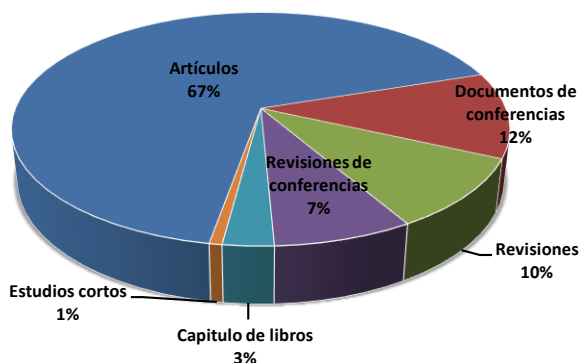
**Figura 3. Evolución de los últimos 15 años según Scopus de tecnologías encontradas y aplicadas a lodos generados por una PTAP.**



Fuente: Scopus. <http://www.scopus.com/> (Consultado: Julio 4, 2014).

La Figura 3, muestra una alta actividad investigativa sobre aplicaciones de los lodos generados por las PTAP`s por la base de datos Scopus. Se observa un total de 143 documentos relacionados con el tema en mención y una mayor actividad en investigación y publicaciones en los últimos dos años.

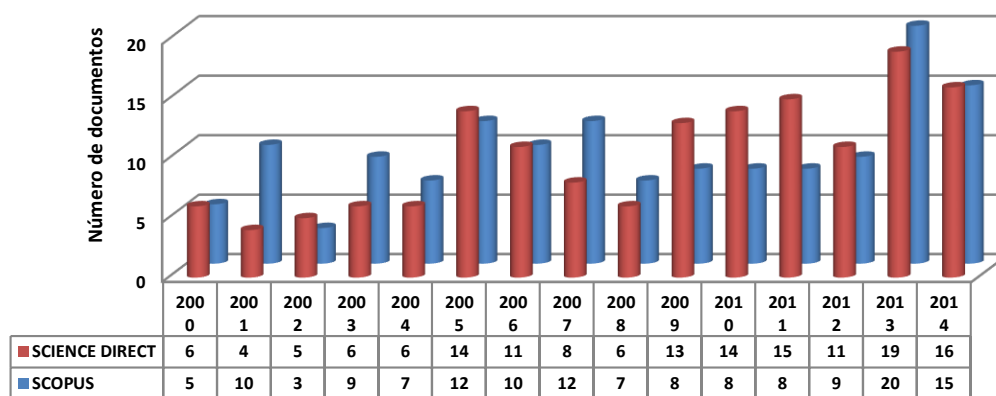
Figura 4. Tipo de documentos encontrados en la base de datos Scopus en los últimos 15 años relacionados con los lodos provenientes de las PTAP`s.



Fuente: Scopus. <http://www.scopus.com/> (Consultado: Julio 4, 2014).

De los 143 documentos encontrados relacionados con el tema de estudio, 67% son artículos, 12% documentos generados de conferencias, un 10% *reviews*, 7% de resúmenes de conferencias, 3% Capítulos de libros y un 1% estudios cortos (Figura 4).

Figura 5. Síntesis de la literatura científica encontrada sobre aplicaciones y nuevas tecnologías para lodos generados en PTAR`s.

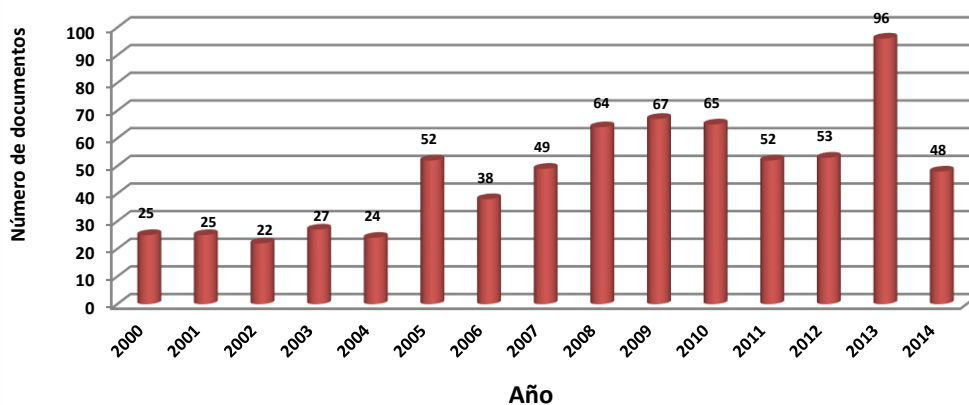


Fuente: Scopus. <http://www.scopus.com/> (Consultado: Julio 4, 2014). Science Direct. <http://www.sciencedirect.com/> (Consultado: Julio 4, 2014)

Realizando una comparación entre los documentos encontrados en Scopus y Science Direct, se observa un crecimiento aproximadamente igual entre las dos (Figura 5). Esto se debe posiblemente a que ambas son de la misma editorial Elsevier. También es importante resaltar que se realizaron consultas en fuentes alternativas como la organización mundial de la salud (OMS).

En la búsqueda de información para la aplicación de los lodos generados en las PTAR las palabras claves utilizadas fueron: “*utilization*”, “*sludge*”, “*sewage*”, “*residual*” and “*water*”.

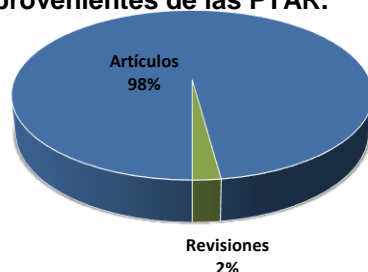
**Figura 6. Evolución de los últimos 15 años según Science Direct de tecnologías encontradas y aplicadas a lodos generados por una PTAR.**



Fuente: Science Direct. <http://www.sciencedirect.com/> (Consultado: Julio 4, 2014)

La Figura 6, muestra la evolución de la literatura científica de los últimos 15 años, relacionada con el estudio de nuevas tecnologías y aplicaciones de los lodos generados en las PTAR`s, con un total de 707 documentos relacionados para la base de datos Science Direct. Se puede observar un gran auge en investigación entre los años 2005 al 2014, esta dinámica muestra el interés científico por solucionar un problema que por años ha afectado al medio ambiente.

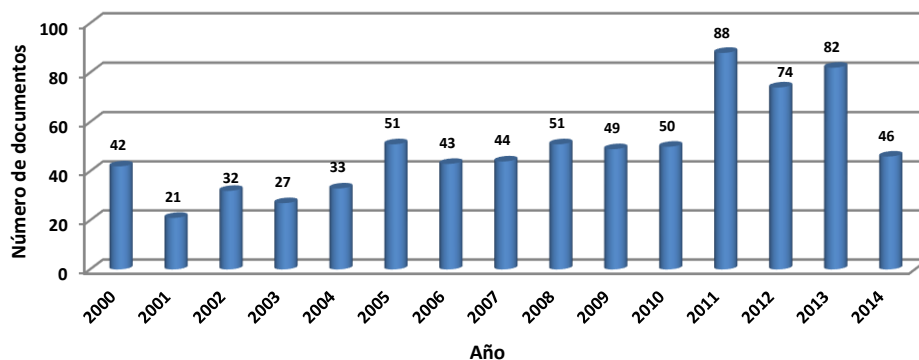
**Figura 7. Literatura científica encontrada en Science Direct en los últimos 15 años relacionados con los lodos provenientes de las PTAR.**



Fuente: Science Direct. <http://www.sciencedirect.com/> (Consultado: Julio 4, 2014)

De la información encontrada en la base de datos de Science Direct, el 98% son artículos científicos y el 2% reviews (Figura 7).

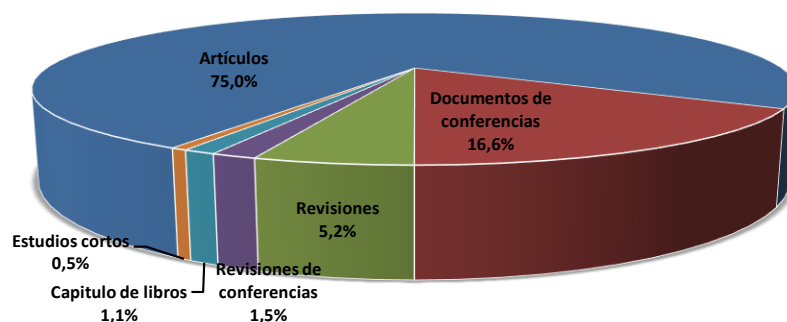
**Figura 8. Evolución de los últimos 15 años según Scopus de tecnologías encontradas y aplicadas a lodos generados por PTAR.**



Fuente: Scopus. <http://www.scopus.com/> (Consultado: Julio 4, 2014)

Según el histograma de la Figura 8, Scopus tiene 733 documentos publicados relacionados con el uso y aplicación de los lodos generados en las PTAR`s. Se observa una actividad mayor en los últimos 4 años.

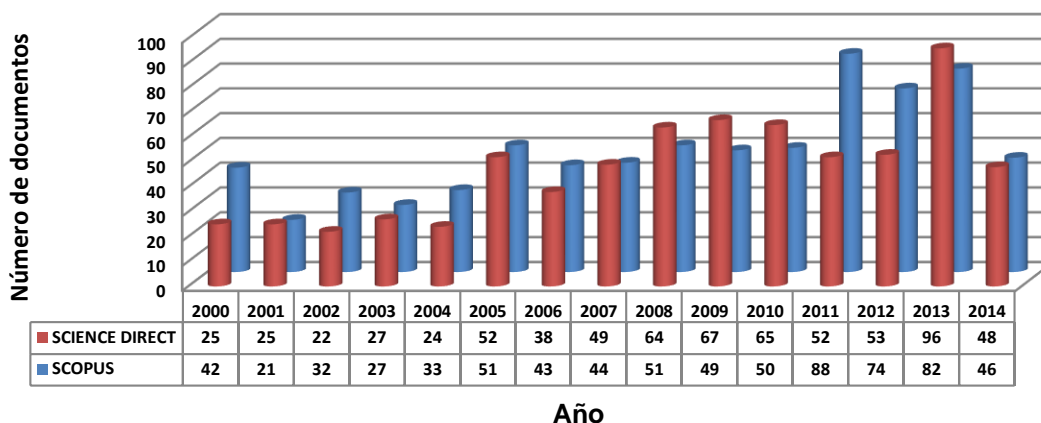
**Figura 9. Literatura científica encontrada en la base de datos Scopus en los últimos 15 años relacionados con los lodos provenientes de las PTAR.**



Fuente: Scopus. <http://www.scopus.com/> (Consultado: Julio 4, 2014)

A su vez, de la información encontrada, el 75% son artículos científicos, el 16% documentos de conferencias, 5.2% reviews, 1.1% capítulos de libros y el 0.5% estudios cortos. Lo que manifiesta una alta actividad investigativa sobre el tema en el mundo (Figura 9).

**Figura 10. Compilación de la literatura científica encontrada sobre aplicaciones y nuevas tecnologías para los lodos generados en PTAR.**



Fuente: Scopus. <http://www.scopus.com/> (Consultado: Julio 4, 2014). Science Direct. <http://www.sciencedirect.com/> (Consultado: Julio 4, 2014)

De acuerdo con las figuras 5 y 10 se mantiene una tendencia al aumento de los artículos publicados sobre la aplicación de los lodos de PTAR`s. Esto se traduce en una actividad investigativa muy dinámica guiada probablemente por el aumento en la población, y el consecuente aumento en el volumen de los lodos generados por plantas de tratamiento de aguas. Adicionalmente, también existe el precedente de las terribles consecuencias, en términos de daños al medio ambiente y salud pública, generadas años atrás por la disposición inadecuada de estos materiales. También se observa que hay mayor actividad científica y publicación de artículos en relación con aplicaciones de lodos de PTAR comparado con los de PTAP (figuras 5 y 10), probablemente por la misma razón mencionada anteriormente.

## 2. ASPECTOS GENERALES

La creciente urbanización junto con el aumento de la contaminación de las aguas debido a su mal uso o uso desmesurado, obligan a los generadores tanto privados como públicos de lodos, a evaluar una estrategia eficiente para su gestión (MAVDT, 2006). Convencionalmente, los lodos residuales se disponen a través de la incineración, el enterramiento o eliminación en el océano, así como el reuso como acondicionador del suelo en la agricultura (Kamar y Shang, 2013).

Los lodos residuales provienen de diferentes etapas del tratamiento de aguas y se forman según los procesos que se apliquen. Los lodos primarios se generan al inicio de un tren de tratamiento de aguas, los biológicos en la etapa del tratamiento biológico, y los mixtos al mezclarse lodos primarios y secundarios o químicos, que provienen exclusivamente del tratamiento fisicoquímico del agua (Noyola et al., 2000). Debido a su origen, su consistencia acuosa, volumen y su naturaleza putrescible, la mayor parte de estos lodos requiere de tratamiento antes de ser dispuestos. El proceso de tratamiento tiene como objetivo asegurar la eliminación de patógenos, incrementar la aceptabilidad sensorial de los lodos (estabilizándolos o mineralizándolos), y reducir su volumen y peso (Cardenas y Masmela, 1988).

Con el tratamiento, el agua residual queda libre de sustancias contaminantes que se remueven o transforman en otras concentradas en el lodo residual. Una gran variedad de sustancias constituyen la masa del lodo, que le imparten color, olor y propiedades características, además de presentarse en una concentración variada. Los lodos contienen sustancias químicas, orgánicas e inorgánicas, y biológicas (microorganismos) que pueden representar un riesgo ambiental (Andreoli et al., 2001). Las características de los sólidos presentes en el lodo dependen del tipo de agua que se trata en la planta, es decir, su composición depende del origen de las descargas ya sean industriales, municipales, mixtas o agropecuarias. Por esta razón es importante conocer la composición del lodo para su tratamiento y disposición final (Colín et al., 1989). Teniendo en cuenta que el tratamiento de lodos requiere de un proceso de estabilización, adecuación y deshidratación (Kely, 1999), es importante que la

aplicación de compuestos químicos a las aguas en los procesos de precipitación, coagulación, floculación, acondicionamiento y desinfección sea la adecuada. Por otra parte la disposición final de los lodos, cuando no existen procesos o alternativas de uso, es también un gran problema ya que se requieren grandes extensiones de terreno o su transporte a sitios autorizado donde además se deben tratar los lixiviados producidos.

En Colombia el RAS 2000 regula el manejo y tratamiento antes de la disposición final tanto de LTAP como LTAR. El Decreto 4741 de 2005, se aplica para la gestión de los LTAP, cuando previamente se realiza una separación sólido-líquido.

En la actualidad existen numerosos grupos de investigación, concentrados especialmente en la Comunidad Económica Europea y en Estados Unidos, que estudian y formulan alternativas para el manejo de estos lodos con especial énfasis en sus características fisicoquímicas y microbiológicas. Algunos países, utilizan estos lodos como mejoradores de suelos o como materia prima para compostaje. Sin embargo, a pesar de la gran actividad investigativa sobre alternativas de uso de estos residuos y a la existencia de plantas piloto, en la mayoría de los casos los lodos se disponen en rellenos sanitarios o se incineran en plantas de combustión.

Existen algunas iniciativas que vale la pena mencionar, como el caso del programa de gestión de biosólidos (*Biosolids Management Program*, BMP), regulado por La Asociación Nacional de Biosólidos en los Estados Unidos. La asociación brinda capacitación y apoyo a las organizaciones en la gestión de biosólidos, ayudando a que sus programas sean ecológicamente racionales y enfocados en la protección de la salud pública (WEF, 2014).

Es evidente que el tema del manejo de los lodos, provenientes del tratamiento de aguas potables y residuales, es un área activa de investigación debido a la necesidad existente de formular alternativas para su uso, diferentes a las tradicionales como disposición en rellenos sanitarios e incineración.

### **3. FORMACIÓN DE LODOS EN UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE**

#### **3.1. Características y composición.**

Los lodos del tratamiento de agua potable (LTAP) son un subproducto inevitable de la producción de agua potable. En el pasado, estos residuos no se trataban y se disponían en rellenos sanitarios o en botaderos a cielo abierto. En la actualidad con el aumento de producción de estos lodos, consecuencia de la necesidad de incrementar el suministro de agua potable a poblaciones en expansión, surgen muchos problemas técnicos y económicos asociados con su disposición final y con la contaminación atmosférica que producen (El-Didamony et al., 2014). La legislación actual clasifica los LTAP como residuos que se tratan químicamente y se deshidratan antes de su eliminación. Aunque en los últimos años se han estudiado varias alternativas para la disposición, regeneración y reutilización de los LTAP (Babatunde y Zhao, 2007), la búsqueda de opciones ecológicas y rentables de uso se ha convertido en una prioridad urgente debido a estrictas regulaciones ambientales y la disminución de la aceptación pública de los vertederos. Sin embargo, la principal preocupación en cuanto al reuso de los LTAP, radica en su naturaleza y toxicidad.

Los LTAP se pueden clasificar por su naturaleza en: Lodos de coagulante natural, lodos de aguas subterráneas o de ablandamiento, y lodos de manganeso. Los lodos coagulados son el producto final de la mayoría de las plantas de tratamiento y contienen comúnmente sales de aluminio o de hierro. En su mayoría se encuentran en forma gelatinosa, con concentraciones variables de microorganismos, materia orgánica y suspendida, productos coagulantes y elementos químicos. En la Tabla 3 se muestra la composición básica de los LTAP (El-Didamony et al., 2014).

**Tabla 3. Composición típica de LTAP (valores medios + SD) derivados**

Parámetro	Unidad	Lodo de aluminio	Lodo Férrico	Lodo de cal
<b>Aluminio</b>	% Peso seco	29.7 ± 13.3	10.0 ± 4.8	0.5 ± 0.8
<b>Hierro</b>	% Peso seco	10.2 ± 12	26.0 ± 15.5	3.3 ± 5.8
<b>calcio</b>	% Peso seco	2.9 ± 1.7	8.32 ± 9.5	33.1 ± 21.1
<b>Magnesio</b>	% Peso seco	0.89 ± 0.8	1.6	2.2 ± 1.04
<b>SiO2</b>	% Peso seco	33.4 ± 26.2	nd	54.57
<b>pH</b>	Unidad	7.0 ± 1.4	8.0 ± 1.6	8.9 ± 1.8
<b>DBO5</b>	mg/l	45 (2-104)	nd	nd
<b>P</b>	% Peso seco	0.35	0.36	0.02
<b>Zinc</b>	mg/kg	33.9 ± 28	18.7 ± 16	2.5 ± 0.7
<b>Plomo</b>	mg/kg	44.1 ± 38.2	19.3 ± 25.3	1.87 ± 1.13
<b>Cadmio</b>	mg/kg	0.5	0.48 ± 0.26	0.44 ± 0.02
<b>Níquel</b>	mg/kg	44.3 ± 38.4	42.9 ± 39.2	0.98 ± 0.52
<b>Cobre</b>	mg/kg	33.72 ± 32.5	18.7 ± 25.8	3.6 ± 3.1
<b>Cromo</b>	mg/kg	25.0 ± 20.1	25.7 ± 21.6	1.3 ± 0.2
<b>Cobalto</b>	mg/kg	1.06	1.61 ± 1.1	0.67 ± 0.05
<b>Solidos totales</b>	mg/l	(2500-52345)	(2132-5074)	nd

Fuente: (Georgantas et al., 2003; Godbold et al., 2003; Sotero-Santas, 2005; Titshall and Hughes, 2005; Yang et al., 2005; El-Didamony et al., 2014).

NOTA: \* nd se refiere a no se ha registrado dato.

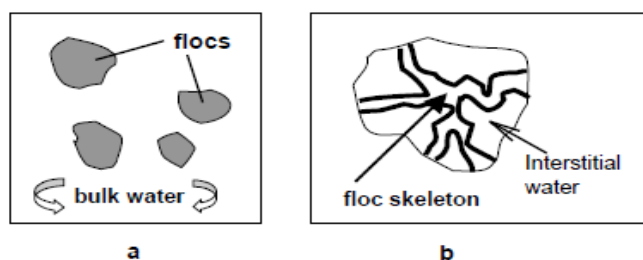
\*\* Los datos entre paréntesis indica rango.

Los constituyentes básicos de los LTAP no varían mucho, sin embargo su abundancia si depende de su procedencia y de las características de la fuente de abastecimiento de agua, del tipo de coagulante utilizado, la dosis aplicada, y de las condiciones de operación de las plantas. Para la eliminación de niveles elevados de color y turbidez en el agua natural que se va a potabilizar, se requiere de una alta concentración de aditivos químicos durante el tratamiento, lo que aumenta la cantidad de los lodos e influye en sus características. La materia contenida de estos lodos puede ser materia inorgánica y orgánica carbonosa. El contenido de material inorgánico en un agua es el directamente responsable de la turbidez, mientras el contenido de material orgánico carbonoso influye en el color, y olor. Los ácidos fúlvicos son el principal componente de los materiales orgánicos presentes en aguas naturales, aunque también están presentes compuestos húmicos e himatomelánicos. Estos compuestos son formados por la descomposición de materia vegetal, y su

persistencia y presencia en los suelo causa que el agua tome un color no deseado, color marrón o amarillo (Babatunde y Zhao, 2007).

Los lodos de PTAP`s están compuestos de varias fases que se diferencian por su estado físico y su naturaleza química. En general los LTAP se consideran compuestos de flóculos (fase sólida) y agua (fase líquida) que forman una red tridimensional tal y como se muestra en la Figura 11.

Figura 11. (a) flóculos y agua; (b) esqueleto del floc y agua intersticial.



Fuente: (Babatunde and Zhao, 2007)

Los flóculos contienen porcentajes variables de agua que oscilan entre el 95 - 99%. (Babatunde y Zhao, 2007) La materia seca del flóculo proviene de la precipitación de impurezas presentes en el agua cruda (material inorgánico, orgánico – ácidos húmicos y fúlvicos- y cationes divalentes) y los sólidos depositados por el coagulante. Por ejemplo, Babatunde y Zhao (2007) reportan que aproximadamente el 50% de masa seca de flóculo está compuesta por productos coagulantes (de alumbre) en condiciones óptimas de coagulación. Este valor coincide con un 46% en masa de  $Al_2O_3$  reportado por Yang *et al.* para un lodo de alumbre irlandés (Yang *et al.*, 2006a).

### 3.2. Toxicidad

Debido a la necesidad establecer los efectos tóxicos de los LTAP, relacionados principalmente con su contenido de metales pesados, en 1995 George *et al.* (1995). realizaron un estudio de toxicidad a los lodos de alumbre de diez plantas de aguas en toda América del Norte. Utilizando la especie de microalgas *S. caprocornutum*, el estudio reveló una correlación entre el pH de

lodo y la inhibición del crecimiento de estos microorganismos. Los autores concluyen que los componentes solubles de los lodos de alumbre, cuando se vierten en aguas receptoras, pueden afectar el crecimiento de algas (George et al., 1995). Sotero-Santos et al. (2005) hicieron un análisis comparativo sobre la toxicidad de lodos de alumbre y de cloruro férrico sobre *Daphnia* *símiles*, concluyendo que no se presentaba toxicidad aguda a las 48 horas de exposición. Sin embargo la exposición a largo plazo a lodos de cloruro férrico, causa mortalidad y disminución de la reproducción de *Daphnia*, mientras los lodos de alumbre no presentan estos efectos (Sotero-Santos et al., 2005).

A pesar de la variación en las propiedades de los lodos, como el contenido de sólidos, nivel de nutrientes, contenido de metales y concentraciones de DQO, no se observó relación entre la variación de las propiedades y el grado de toxicidad (Babatunde y Zhao, 2007). Dayton y Basta (2001), utilizando el procedimiento de lixiviación para características de toxicidad (PLCT), concluyen que los niveles de metales pesados en lodos residuales son significativamente inferiores a los niveles reglamentarios para PLCT y que estos materiales se pueden considerar como desechos no peligrosos (Dayton y Basta, 2001).

La mayor parte de las preocupaciones asociadas con la toxicidad y el contenido de metales de los lodos de las PTAP's se relacionan con su uso en la agricultura, la horticultura y otras aplicaciones de este tipo. De las tres clases de lodos existentes, el lodo de coagulación (férrico) se caracteriza por presentar niveles considerables de zinc, níquel, cobre, y arsénico (hasta 4g/kg en peso seco) en algunos casos. Este último, se ha convertido en un contaminante inorgánico de importancia en los LTAP. Forstner y Haase (1998) encontraron que la lixiviación de metales de LTAP depende del pH. Por lo tanto, aunque podría haber algún potencial efecto de toxicidad de los LTAP, la magnitud de este efecto siempre se ha considerado insignificante (Forstner y Haase, 1998).

Al momento de buscar una aplicabilidad para los LTAP se debe tener en cuenta su origen, las condiciones del tratamiento y las características de la fuente de abastecimiento de agua. Estos factores determinan la composición del lodo y consecuentemente sus usos. En la mayoría de los casos para los diferentes

tipos de lodos tras la eliminación de metales tóxicos, utilizando comúnmente métodos químicos de precipitación, el material puede utilizarse para una gran cantidad de aplicaciones, que se tratarán en las siguientes secciones de esta monografía.

## **4. FORMACIÓN DE LODOS EN UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL**

### **4.1. Características y composición.**

Los lodos generados a partir del Tratamiento de Aguas Residuales (LTAR) pueden ser de dos tipos: primarios y secundarios. Los primarios corresponden al material recogido de los decantadores primarios empleados en las PTAR`s, donde se remueven los sólidos sedimentables. Si esta sedimentación se realiza con sustancias químicas entonces, hay una mayor producción de lodos consecuencia de una mayor remoción, y de la precipitación química del material coloidal. Por otra parte, los lodos secundarios, también conocidos como lodos biológicos o biosólidos, comprenden a los residuos productos del tratamiento biológico de las aguas residuales y del drenado de los tanques de sedimentación, que incluyen materia particulada que permanece en el agua después de la sedimentación primaria y que se incorpora en la biomasa. La cantidad de lodos producida depende de varios factores: eficiencia del tratamiento primario, relación de SST, DBO, cantidad de sustrato soluble, remoción de nutrientes y criterios de diseño del tratamiento (Smith et al., 2009).

Las características de los lodos generados en las PTAR`s, están definidas por los tipos de tratamientos de las aguas residuales. Los lodos primarios, presentan mejores características de sedimentación y mayor concentración de sólidos que los secundarios. En la Tabla 4 (Metcalf yEddy, 2003) se presentan las características y cantidades de lodo que se producen normalmente en diferentes procesos de tratamiento. Para los lodos secundarios o biológicos se usan microorganismos que remueven la materia orgánica, con procesos aeróbicos o procesos anaeróbicos. Los procesos aerobios son los más usados y se dividen en procesos con biomasa suspendida y procesos con biomasa adherida, aunque también existen algunos híbridos. Los procesos aerobios, aunque tienen las desventajas de un gran consumo de energía y una mayor producción de lodos, permiten obtener una mejor calidad de agua tratada, son más fáciles de operar, y remueven nitrógeno y fósforo además de la materia orgánica. Los procesos anaerobios tienen las principales ventajas de un menor

requerimiento de energía, producción de metano que puede ser utilizado para generación de energía. Sin embargo, estos procesos tienen un largo periodo de arranque, no se lleva a cabo la remoción biológica de nitrógeno y fósforo y generalmente se requiere una etapa aerobia posterior para cumplir con los criterios de calidad del agua tratada (Metcalf y Eddy, 2003). Adicionalmente el volumen de lodo depende del contenido de humedad. Un lodo primario tiene del 91 al 95% de humedad, con un valor típico del 94%. En cambio, un lodo secundario, tiene del 98.5 al 99.5% de humedad, con un valor típico del 99.2% (Metcalf y Eddy, 2003).

**Tabla 4. Características y cantidades de lodo típicas**

<b>Proceso</b>	<b>Gravedad específica sólidos</b>	<b>Gravedad específica lodo</b>	<b>Producción de sólidos secos, kg/1000 m<sup>3</sup></b>
<b>Sedimentación primaria</b>	1.4	1.02	110-170
<b>Lodos activados (purga)</b>	1.25	1.005	70-100
<b>Filtro biológico (purga)</b>	1.45	1.025	60-100
<b>Aireación extendida (purga)</b>	1.30	1.015	80-120
<b>Laguna aireada (purga)</b>	1.30	1.01	80-120
<b>Filtración</b>	1.20	1.005	12-24
<b>Remoción algal</b>	1.20	1.005	12-25
<b>Sedimentación primaria con adición de cal (350-500 mg/l)</b>	1.9	1.04	240-400
<b>Sedimentación primaria con adición de cal (800-1,600 mg/l)</b>	2.2	1.05	600-1,300
<b>Denitrificación con biomasa suspendida</b>	1.20	1.005	12-24
<b>Filtro biológico de desbaste</b>	1.28	1.02	-

Fuente: (Metcalf and Eddy, 2003)

La cantidad de lodos producidos se ve afectada por la eficiencia del tratamiento, mientras la calidad depende de la carga contaminante del efluente tratado, y a su vez, de las características técnicas y el diseño del proceso de tratamiento (Latunus et al., 2007). Por ejemplo, para el 2005 se estimó una

producción de 10 millones de toneladas de lodo por año en Europa (Tabla 5). Por otra parte, la fracción sólida de los LTAR oscila entre 0.25-12% en peso (Fytily y Zabaniotou, 2008; European Commission, 2002), esta variabilidad se debe a los diferentes métodos de tratamiento de los efluentes.

**Tabla 5. Producción anual de lodos de PTAR, en 25 estados miembros de la Unión Europea.**

Estados Miembros de la UE	Producción de lodos [toneladas secas]	Porcentaje total de producción en la UE [%]	Año de publicación	Referencia
<b>Australia</b>	196000	1,88	2000	Magoarou 2000
<b>Bélgica</b>	160000	1,54	2000	Magoarou 2000
<b>Chipre</b>	12000	0,12	2001	European Commission Scientific and Technical Sub-component Report 2001
<b>Republica Checa</b>	200000	1,92	2006	ECN country report 2006a
<b>Dinamarca</b>	200000	1,92	2000	Magoarou 2000
<b>Estonia</b>	53000	0,51	2001	European Commission Scientific and Technical Sub-component Report 2001
<b>Finlandia</b>	160000	1,51	2000	Magoarou 2000
<b>Francia</b>	1172000	11,3	2000	Magoarou 2000
<b>Alemania</b>	2786000	26,7	2000	Magoarou 2000
<b>Grecia</b>	99000	0,95	2000	Magoarou 2000
<b>Hungría</b>	230000	2,21	2004	Petróczki 2004
<b>Irlanda</b>	113000	1,09	2000	Magoarou 2000
<b>Italia</b>	800000	7,66	2000	Renner 2000a
<b>Letonia</b>	23000	0,22	2001	European Commission Scientific and Technical Sub-component Report 2001
<b>Lituania</b>	48000	0,46	2001	European Commission Scientific and Technical Sub-component Report 2001
<b>Luxemburgo</b>	14000	0,13	2000	Magoarou 2000
<b>Malta</b>	400	0,004	2001	European Commission Scientific and Technical Sub-component Report 2001
<b>Países Bajos</b>	401000	3,84	2000	Magoarou 2000
<b>Polen</b>	360000	3,46	2001	ECN country report 2006b
<b>Portugal</b>	359000	3,45	2000	Magoarou 2000

<b>Eslovaquia</b>	86000	0,83	2000	European Commission Scientific and Technical Sub-component Report 2001
<b>Eslovenia</b>	90000	0,86	2000	European Commission Scientific and Technical Sub-component Report 2001
<b>España</b>	1088000	10,5	2001	Magoarou 2000
<b>Suecia</b>	180000	1,73	2000	Scope Newsletter 2000
<b>Reino Unido</b>	1583000	15,2	2000	Magoarou 2000
<b>UE total</b>	<b>10413400</b>	<b>100</b>		

Fuente: (Latusus et al., 2007)

Los principales componentes de la fracción sólida de los LTAR son proteínas, grasas (jabón, aceite, grasa), urea, celulosa, sílice, nitrógeno, ácido fosfórico, hierro, óxido de calcio, óxido de aluminio, óxido de magnesio y potasio (Smith et al., 2009). También están presentes los metales pesados y una amplia variedad de minerales. La Tabla 6 muestra que la composición de los LTAR no solo depende de su origen, sino también de los métodos de tratamiento de lodos.

**Tabla 6. Composición química típica y propiedades de los lodos primarios no tratados / digerido y secundarios**

Artículo / lodos	Primaria no tratada		Primaria digerido		Lodo secundario
	Rango	Típico	Rango	Típico	
<b>Total de sólidos secos (% ST)</b>	5-9	6	2-5	4	0,8-1,2
<b>Sólidos volátiles (% de ST)</b>	60-80	65	30-60	40	59-88
<b>Grasa y Aceites (% de ST)</b>	-	-	-	-	-
<b>Solubilidad en éter</b>	6-30	-	5-20	18	-
<b>Extracto etéreo</b>	7-35	-	-	-	05-12
<b>Proteína (% de ST)</b>	20-30	25	15-20	18	32-41
<b>Nitrógeno (N,% de ST)</b>	1.5-4	2.5	1,6-3	3	2,4-5
<b>Fósforo (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, % de ST)</b>	0,8-2,8	1.6	1,5-4	2.5	2,8-11
<b>Potasio (K<sub>2</sub>O,% de ST)</b>	0-1	0.4	0-3	1	0.5-0.7

<b>Celulosa (% de ST)</b>	8-15	10	8-15	10	-
<b>Hierro (No como sulfuro, % de ST)</b>	2-4	2.5	3-8	4	-
<b>Sílice (SiO<sub>2</sub>, % de ST)</b>	15-20	-	10-20	-	-
<b>Alcalinidad (mg / l como CaCO<sub>3</sub>)</b>	500-1500	600	2500-3500	3000	580-1100
<b>Ácidos orgánicos (mg / l como HAc)</b>	200-2000	500	100-600	200	1100-1700
<b>Contenido de energético (KJ ST/kg)</b>	23000- 29000	25000	9000- 14000	12000	19000- 23000
<b>pH</b>	5-8	6	6 - 7.5	7.0	6.5-8

Fuente: (Fytily and Zabaniotou, 2008).

Teniendo en cuenta los principios de sostenibilidad y las propiedades de los lodos, existen varias restricciones al momento de buscar una aplicación para los lodos generados de los procesos de tratamiento de aguas residuales que se describieron anteriormente. Algunas de estas restricciones se presentan en la Tabla 7 (Fytily y Zabaniotou, 2008).

**Tabla 7. Restricciones sobre la gestión de los lodos basado en principio de sostenibilidad.**

<b>Método de tratamiento de lodos</b>	<b>Restricciones</b>
<b>El uso agrícola (restricciones similares para la horticultura y bosques)</b>	Componentes de lodos (metales, compuestos orgánicos tóxicos, patógenos).
	Los nutrientes y metales de alimentación a la tierra.
	La aceptación de la industria alimentaria y pública.
<b>Deposición Tierra</b>	Restricciones técnicas (manejo de los lodos, etc).
	Contenido orgánico máximos en el lodo.
	Contenido orgánico máximos en el lodo.
	Costos basados en honorarios.
	La escasez de tierras.
<b>Suelo y recuperación</b>	Requisitos de reciclaje (es decir, patógenos).
	Los permisos de construcción de una planta de incineración.

<b>La recuperación del producto de lodos</b>	Posibilidades de co-incineración.
	Los costos (incluyendo costos de tratamiento de los gases de combustión y cenizas).
	La aceptación de los usuarios de los productos de lodos (consideraciones de mercado).
	Necesidades de recursos para la recuperación del producto (productos químicos, energía, costes, etc).
	Restricciones debidas a problemas técnicos.

Fuente: (Lundin et al., 2004)

Para evaluar las tecnologías de aprovechamiento térmico de los LTAR, y teniendo en cuenta las restricciones sobre la gestión de los mismos, se ha analizado el potencial energético que estos poseen, demostrándose que los LTAR son un tipo de biomasa, con un potencial energético atractivo comparado con algunos combustibles, y tiene un valor calorífico similar al del carbón descrito en la Tabla 8 (Fytily y Zabaniotou, 2008).

**Tabla 8. Valores caloríficos típicos para varios tipos de lodos de depuradora**

Tipo de lodos	Valor calorífico (MJ / kg de DS)	
	Alcance	Típico
Lodos sin procesar	23-29	25.5
Lodo activado	16-23	21
Lodo primario digerido anaeróbicamente	9-13	11
Sin procesar lodo primario precipitado químicamente	14-18	16
Filtro biológico de lodos	16-23	19.5

Fuente: (Fytily and Zabaniotou, 2008)

## 4.2. Toxicidad

Dados los procesos físico-químicos implicados en el tratamiento de los LTAR eventualmente en ellos se acumulan los metales pesados y residuos inorgánicos existentes en las aguas residuales (Fytily y Zabaniotou, 2008), lo cual los hace muy diferentes a los LTAP (UNEP, 2014). Los metales pesados como zinc (Zn), cobre (Cu), níquel (Ni), cadmio (Cd), plomo (Pb), mercurio (Hg) y cromo (Cr) son los principales elementos que restringen la utilización de lodos

para uso agrícola (Fytili y Zabaniotou, 2008), debido a que su potencial de bioacumulación (en tejidos animales y vegetales) y de biomagnificación (a través de la cadena alimentaria) impactan negativamente al ambiente y la salud humana (Fytili y Zabaniotou, 2008). Las concentraciones típicas de metales en LTAR se indican en la Tabla 9 (Fytili y Zabaniotou, 2008).

**Tabla 9. Contenido típico de metales en los lodos de aguas residuales**

Metal	Lodo seco (mg/kg)	
	Rango	Mediana
Arsénico	1,1 a 230	10
Cadmio	1-3,410	10
Cromo	10-990,000	500
Cobalto	11,3-2490	30
Cobre	84-17,000	800
Hierro	1000-154,000	17000
Plomo	13-26,000	500
Manganeso	32-9870	260
Mercurio	0,6-56	6
Molibdeno	0,1 a 214	4
Níquel	2-5300	80
Selenio	1,7-17,2	5
Estaño	2,6 a 329	14
Zinc	101-49,000	1700

Fuente: (Fytili and Zabaniotou, 2008).

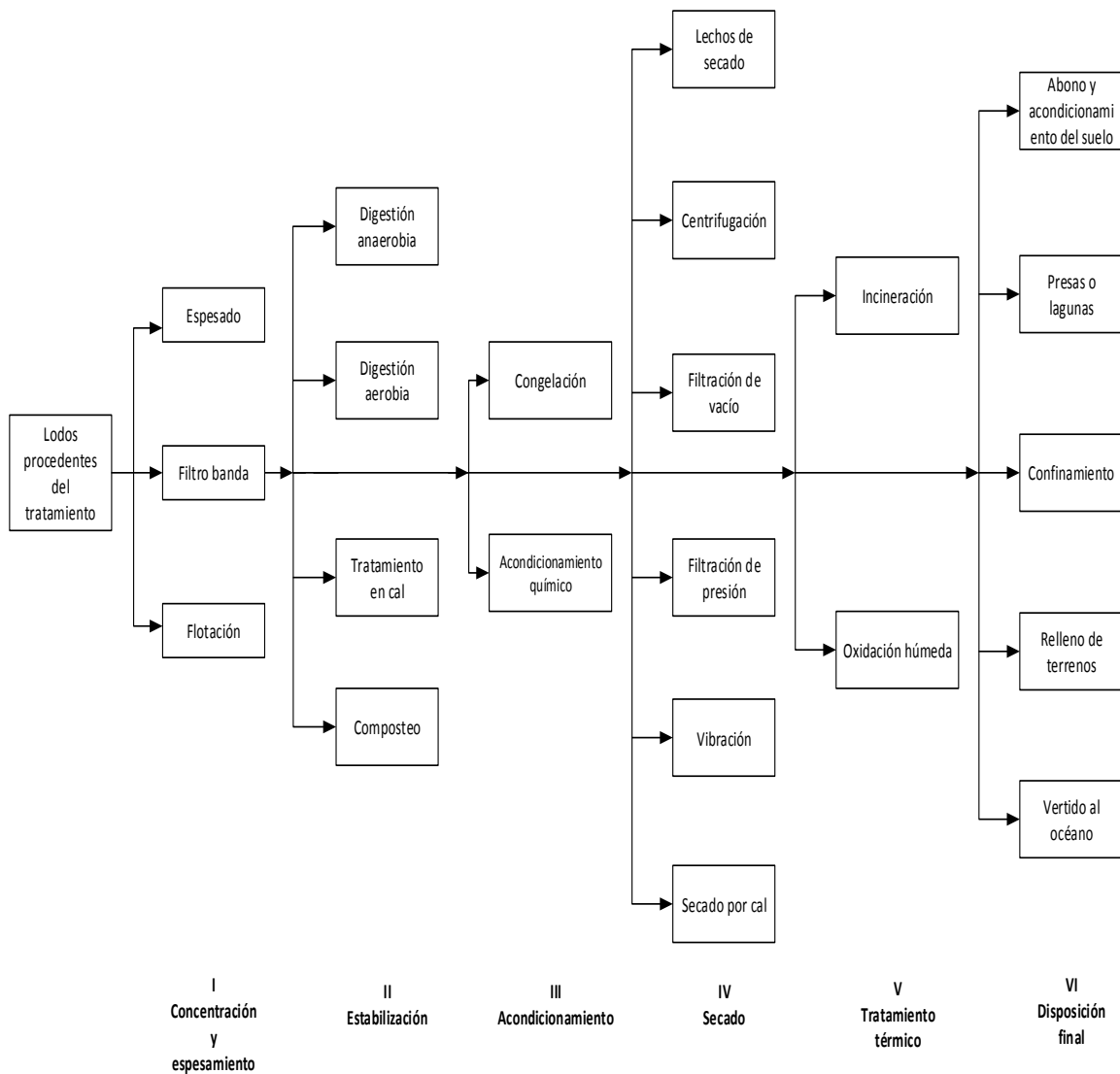
Álvarez *et al.* (2002) investigaron la extracción secuencial y toxicidad de Al, Cd, Co, Cu, Cr, Fe, Mn, Hg, Mo, Ni, Pb, Ti y Zn. Los autores reportan que el Cd, Co, Mo, Ni y Ti no presentan efectos tóxicos debido a que están presentes en bajos niveles, mientras que el Cr, Cu, Pb que están en alta concentración pueden tener efectos nocivos que condicionan su reutilización o disposición final (Álvarez *et al.*, 2002, Fuentes *et al.*, 2004).

#### **4.3. Manejo y disposición de los lodos generados del tratamiento de agua residual**

Los procesos de manejo y disposición de los lodos residuales representan hasta el 50 % de los costos de operación de una PTAR (Noyola et al. 2000). Por lo tanto el tratamiento y disposición de lodos residuales en muchos casos puede convertirse en la operación más complicada y costosa en una PTAR, si no se lleva a cabo en forma adecuada. En el tratamiento primario pueden producirse hasta 0.25 a 0.35 % de LTAR a partir de las aguas residuales tratadas, que puede aumentar de 1.5 a 2.0 % si se utiliza el proceso de lodos activados más un 1.0 % adicional si se aplican sustancias químicas para la remoción de fosfatos (Noyola et al. 2000). Los procesos básicos para el tratamiento de lodos residuales se describen a continuación (Metcalf & Eddy, 2003; Ramalho, 1996; Andreoli et al., 2001; Norma OS. 090):

- *Espesamiento.* Que consiste en la separación de la mayor cantidad posible de agua por gravedad o flotación (Figura 12).
- *Estabilización.* Proceso de conversión de sólidos orgánicos en formas más refractarias con el propósito de que puedan manejarse o usarse como acondicionadores de suelo, sin causar daño o peligro a la salud. El proceso puede ser biológico o químico (Figura 12).
- *Acondicionamiento.* El lodo residual, se trata con sustancias químicas o calor para que el agua pueda separarse rápidamente (Figura 12).
- *Deshidratado.* Además de lo anterior, el lodo se somete a vacío, presión o secado para separar el agua (Figura 12).
- *Reducción.* Este proceso tiene el propósito de disminuir el volumen de lodo y los sólidos se convierten a formas más estables, como puede ser por tratamientos térmicos como incineración, pirólisis y plasma (Figura 12).

**Figura 12. Procesos aplicados en cada etapa de tratamiento de lodos residuales para su disposición final.**



**Fuente: (Cambell, 2000).**

Al tratar los lodos residuales, se busca transformar la materia orgánica e inorgánica en material inactivo, es decir, que no sea corrosivo, reactivo, explosivo, tóxico, inflamable ó biológico-infeccioso, además de disminuir el volumen para una adecuada disposición final (Cambell, 2000). Si esto se logra, es posible ver los lodos desde una óptica diferente y considerar dos componentes económicamente viables para reciclar: nutrientes (principalmente nitrógeno y fósforo) y energía (carbón) (OMS, 1989). Con respecto a esta última, las vías más significativas son la digestión anaerobia de los lodos con recuperación de biogás, la co-digestión, la incineración y la incineración con recuperación de energía, la pirólisis, la gasificación, la oxidación supercrítica

(húmeda), la producción de materiales de construcción, la producción de biocombustibles (hidrógeno, gas de síntesis, bio-aceite), y la generación de electricidad.

## **5. REUTILIZACIÓN DE LODOS GENERADOS EN SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE Y RESIDUAL**

### **5.1. USO DE LODOS PROVENIENTES DE UN PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE**

En la búsqueda bibliográfica realizada sobre los lodos generados del tratamiento de agua potable, se identificaron a nivel mundial más de once opciones de reutilización clasificadas en cuatro categorías principales:

#### **5.1.1. Uso de los lodos del tratamiento de agua potable en los procesos de tratamiento de aguas residuales**

Los LTAP, especialmente los lodos de alumbre se han utilizado para mejorar el rendimiento en procesos de tratamiento de aguas residuales. Los LTAP usados en las PTAR`S (Guan et al., 2005) mejoran el acondicionamiento de los lodos de PTAR`s (Lai y Liu, 2004) y aumentan la eliminación de fósforo durante el tratamiento de aguas residuales (Galarneau y Gehr, 1997), además de contribuir a minimizar el impacto ambiental que estos generan al medio ambiente al no realizar su aprovechamiento. Dentro de los aprovechamientos de estos lodos están:

##### **5.1.1.1. Recuperación y reutilización del coagulante**

En las plantas de tratamiento, como paso importante para la purificación de aguas, se añaden sales metálicas para hidrolizar y polímeros orgánicos para coagular los contaminantes suspendidos y disueltos. El uso de sales de metales o polímeros orgánicos representa una parte significativa del costo total del proceso de tratamiento de aguas, y los coagulantes forman parte importante de los lodos producidos. Los intentos de recuperación y reutilización de los coagulantes incrustados en los LTAP, para su uso en los procesos de

tratamiento de aguas residuales, se remontan al siglo XIX con el primer proceso patentado por Jewel, en 1903 (Babatunde y Zhao, 2007), seguido por el tratamiento ácido y las técnicas de separación de membrana (Stendhal et al., 2005; Babatunde y Zhao, 2007).

Existen otros métodos de recuperación como: la acidificación con ácido sulfúrico (Vaezi y Batebi, 2001), el tratamiento alcalino (Masschelein y Devleminck, 1985), la extracción líquido-líquido utilizando la técnica de intercambio de iones de líquido (Dhage et al, 1985; Petruzelli et al, 1998), el concepto de reducción - acidificación (Paul et al, 1978) y el método de membrana para material compuesto (Li y Sengupta, 1995). Aunque la eficacia de los agentes de coagulación recuperados a partir de LTAP es variable, en la mayoría de los casos es satisfactoria. La pureza de estos coagulantes recuperados sigue siendo un tema polémico justo cuando la economía del proceso de recuperación es todavía un tema de debate. Bustamante y Waite (1995) reportan que el aluminio recuperado de los lodos deshidratados a través de alumbre por lixiviación alcalina se utiliza para reducir con eficacia la concentración de fósforo en las aguas residuales de 9 mg/L hasta por debajo de 1 mg/L. Recientemente, Stendahl *et al.* (2005) también reportaron un método de varios pasos llamado el “proceso real” que recupera el aluminio y lo reutiliza como coagulante en procesos de purificación del agua.

En el caso de recuperación de coagulantes a partir de los lodos férricos, el pH del lodo se reduce por adición de ácido a un intervalo en el que la solubilidad del hierro se incrementa significativamente y el hierro se libera de nuevo en solución. Sin embargo, la acidificación puede generalmente implicar el uso de dosis altas y costosas de ácido, que no pueden justificarse económicamente (Babatunde y Zhao, 2007).

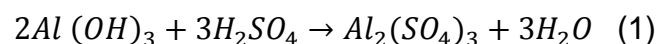
Los procesos de recuperación y reutilización de coagulantes incrustados en la matriz de LTAP tienen como objetivos (Babatunde y Zhao, 2007):

1. Reducir significativamente el costo de coagulantes utilizados en plantas de tratamiento de agua potable y aguas residuales.
2. Ayudar a cumplir las normas de descarga con un costo reducido.

3. Reducir el volumen de lodo y por lo tanto los costos de eliminación.
4. Hacer que los lodos de abastecimiento de agua más adecuados para el depósito en vertederos sin la preocupación por los posibles efectos de acumulación de metal y de lixiviación.
5. Mejorar las características de deshidratación del lodo residual.
6. Aumentar la vida útil de las instalaciones de eliminación de residuos.

El proceso de recuperación puede ser extremadamente complicado, principalmente porque las condiciones que favorecen la recuperación del coagulante pueden variar de un día para otro. Sin embargo, a pesar del hecho de que el proceso de recuperación pueda presentar algunas dificultades, la aplicación de coagulante recuperado en el proceso de tratamiento de aguas residuales se está utilizando en Francia donde el coagulante recuperado, a través de la acidificación, se mezcla con coagulante fresco. Por otra parte, en los Países Bajos se ha estimado que el hierro recuperado de lodos de obras sanitarias podría potencialmente proporcionar 20-70% de la cantidad de hierro necesaria para eliminación de fósforo (Horth et al., 1994).

Aunque existen numerosos reportes a favor de la recuperación, también hay quienes demuestran que la recuperación no es costo-efectiva. Por ejemplo, Petruzelli *et al.* (1998; 2000) reportaron que la pureza de coagulantes recuperados a partir de LTAP no es suficiente para justificar su reutilización, especialmente en el proceso de tratamiento de agua, y que económicamente el proceso de recuperación es costoso. Para recuperar el alumbre, se adiciona ácido sulfúrico a los LTAP de acuerdo con la siguiente reacción:



Para disolver 1 g de  $Al^{3+}$  en forma de hidróxido de aluminio, se necesitan 5,4 g de  $H_2SO_4$ . El costo total del proceso de recuperación es de 371 USD / por tonelada de lodo (Babatunde y Zhao, 2007). Por otra parte, Horth *et al.* (1994)

señalaron que los metales pesados acumulados en los LTAP pueden contaminar el coagulante recuperado.

La recuperación de coagulantes y/o floculantes a partir de LTAP para su reuso en tratamientos de agua residual, es una tecnología que reduce algunos de los impactos de los LTAP y que promueve su aprovechamiento. Sin embargo la principal desventaja de la aplicación de esta tecnología es el costo de recuperación.

#### **5.1.1.2. Uso directo del lodo generado del tratamiento de agua potable como coagulante y floculante en el tratamiento de aguas residuales**

Si bien las consideraciones económicas y de pureza han reducido la principal razón para la recuperación del coagulante, se han hecho varios intentos para usar directamente los LTAP como coagulantes en el tratamiento de aguas residuales. Durante la floculación, se forma una gran cantidad de lodos, que generalmente tienen concentraciones elevadas de sustancias inorgánicas u orgánicas, así como hidróxido de precipitación derivado de coagulantes inorgánicos con base en aluminio o hierro. El re-uso directo de los LTAP, es un método alternativo para mejorar la eliminación de contaminantes y aumentar la eficiencia de las PTAR`s en términos de costos (Zhou et al., 2012; Guan et al., 2005; Sun et al., 2009; Zhao et al., 2007; Moghaddama et al., 2010). El principal inconveniente de esta aplicación es que la rotura de flóculos reciclados libera compuestos orgánicos y aumenta el contenido de partículas finas en las aguas residuales, lo que deteriora la calidad del agua coagulada. Por esta razón es necesario, antes de usar los LTAP como coagulantes, degradar o solubilizar los constituyentes orgánicos para eliminarlos por coagulación antes de usar el LTAP (Klemeš et al., 2010, Zhou et al., 2013). Por ejemplo, Horth *et al.* (1994) reportan el efecto de la adición de aluminio a los LTAP y su posterior uso en una planta de tratamiento de aguas residuales. Los autores demuestran que bajo estas condiciones, el tratamiento y las características finales de lodos en la PTAR mejoran de manera significativa cuando se usan LTAP.

Por otra parte, se ha observado que la reutilización de lodos cargados con aluminio (lodos de alumbre) en el tratamiento de aguas residuales mejora la eliminación de los SS y del DQO, tanto en tratamiento primario como en la coagulación química. Este método se ha aplicado al tratamiento primario de aguas residuales en Hong Kong (Chen, 1996) debido a que el lodo alumbre contiene una gran parte de hidróxidos de aluminio insolubles (Chu, 1999; Chu, 2001) que pueden actuar como coagulantes. Por otra parte, se ha demostrado que el uso de los lodos de alumbre también mejora la sedimentación del lodo activado residual y aumenta su eficiencia (Salotto, 1973). También se reporta que los LTAP podrían aumentar la producción de gas en el digester de lodos y la capacidad de las centrifugas para deshidratar de lodos (Culp y Wilson, 1973).

Guan *et al.* (2005) estudiaron la viabilidad del re-uso de aluminio de los LTAP para mejorar la eliminación de las partículas contaminantes, como SS y DQO en el tratamiento primario de aguas residuales. Se encontró que el uso de los LTAP en estos procesos mejora la eficiencia de eliminación de SS y DQO en un 20% y 15% respectivamente usando dosis de lodo de 18-20 mg de Al/l. Sin embargo la neutralización de la carga no contribuyó a la mejora de la eliminación de partículas contaminantes, ya que tanto las aguas residuales como los lodos de alumbre utilizados llevan las mismas cargas superficiales negativas (Babatunde y Zhao, 2007).

Montgomery (1985) y Qasim *et al.* (2000) investigaron un proceso de descarga controlada de los lodos de alumbre en un sistema de alcantarillado. Hort *et al.* (1994) reportan que en Francia, los lodos de hidróxido de aluminio descargados a un sistema de alcantarillado que conduce a una planta de tratamiento de agua residual, eliminaron el fosfato hasta en un 94%, en una proporción de dosis de 0,3 a 1 correspondiente a aproximadamente 3.5 mmole/l de Al encontrados en las aguas del sistema de alcantarillado (Horth *et al.*, 1994). En otro estudio sobre el uso de LTAP a base de hierro como un coagulante en el tratamiento de aguas residuales de la refinería de aceite vegetal, Basibuyuk *et al.* (2004) reportaron excelentes rendimientos de eliminación de aceite, grasa, DQO y SST a un pH óptimo de 6 y la dosis de lodo de 1100 mg SS / l. Se observó que el lodo de hierro fue tan eficiente como

el uso de alumbre o cloruro férrico, y la eliminación se mejoró aún más cuando se combina con cloruro férrico a diversas dosis. En comparación con el uso de coagulantes originales, no reutilizados, también se informó de la eliminación eficiente de color usando LTAP en el tratamiento de efluentes textiles, aguas residuales y colorantes (Chu, 2001). Sin embargo, se informó que su uso era inadecuado para tintes con características hidrofílicas. En otro estudio, los lodos de alumbre también utilizaron efectivamente un proceso de coagulación para mejorar la eliminación del plomo en las aguas residuales (Wei, 1999).

Numerosos estudios se han realizado con respecto al re-uso de los LTAP con alto contenido de aluminio/hierro como agentes de coagulación/floculación en tratamiento de aguas residuales. Los reportes de literatura indican que el uso de los LTAP en el proceso de coagulación de las aguas residuales es viable, lo que evita su eliminación e impacto al ambiente. Es importante tener en cuenta la fuente a tratar, para evaluar la aplicabilidad del lodo y así evitar reacciones adversas, este tipo de lodo se ha estudiado para ser aplicado con buenos resultados a sistemas de alcantarillado y también a las aguas residuales de tratamiento primario.

#### **5.1.1.3. Uso de los lodos generados del tratamiento de agua potable como adsorbente para contaminantes y metales en las aguas residuales**

En los últimos años se ha investigado sobre la posibilidad de usar los LTAP como adsorbentes para la eliminación de diversos contaminantes y metales en las aguas residuales, como cobre, plomo (Wu et al., 2004a) y fluoruro (Sujana et al., 1998). Wu *et al.* (2004b) afirman que los LTAP adsorben importante cantidad de tóxicos de un agua residual y señalan en particular que en el proceso se puede prevenir la liberación de sustancias nocivas para el medio ambiente.

En cuanto a los principales contaminantes en las aguas residuales, se han realizado extensos estudios sobre la viabilidad de la utilización de LTAP como un adsorbente para la eliminación de fósforo en las aguas residuales (Huang y Chiswell, 2000; Zumpe et al, 2002; Georgantas y Grigoropoulou, 2005); Kim et

al., 2003; Babatunde et al, 2005). Demostrando que los LTAP de alumbre deshidratados tienen potencial uso en la eliminación de especies de fósforo (P) en aguas residuales. Las capacidades de adsorción obtenidas a partir de la isoterma de Langmuir varían para los diferentes tipos de especies de P, así como el pH de la suspensión de P. La más alta capacidad de adsorción se obtiene para ortofosfato (por ejemplo,  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ), seguido de polifosfato (por ejemplo  $(\text{NaPO}_3)_6$ ) y, finalmente, fosfato orgánico (decir  $\text{C}_{10}\text{H}_{14}\text{N}_5\text{O}_7\text{P} \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) (Razali et al., 2007).

La cantidad de aluminio amorfo y iones férricos en los LTAP pueden llegar a ser valiosos para la eliminación de fósforo en las aguas residuales, ya que tales iones se han usado para mejorar los procesos de adsorción y precipitación química que sirven para la inmovilización de fósforo (DE-Basán y Basán, 2004). De igual forma se ha evidenciado que la capacidad de adsorción del P depende en gran medida del pH de la solución (Kim et al, 2003; Babatunde et al., 2005). Por ejemplo, Razali *et al.* (2007) realizaron un estudio donde los LTAP de Al deshidratados eliminaban más del 80% de fósforo en 30 días. Estos autores estiman como viable la opción de construir un humedal a partir de los LTAP de Al, pensando en su utilidad como material de filtro o adsorbente de fósforo. La reutilización de los LTAP de Al como adsorbentes de P no es sólo eficaz, sino también un enfoque potencialmente económico para eliminar P. Los resultados del estudio de Razali *et al.* (2007) podrían revolucionar el manejo de este tipo de lodos, posibilitando su reutilización como un material de bajo costo, en lugar de disponerlos o verterlos, de acuerdo con el concepto de desarrollo sostenible (Razali et al., 2007).

#### **5.1.1.4. Uso de los lodos generados del tratamiento de agua potable Como Co-acondicionador y deshidratador**

Los estudios han demostrado el efecto beneficioso de los LTAP como aditivo co-acondicionador y deshidratador para LTAR. Por ejemplo, los resultados de un estudio sobre la viabilidad del uso de LTAP como material de co-acondicionamiento y deshidratación de LTAR, realizado por Lai y Liu (2004), mostraron que la deshidratabilidad de los LTAR y su decantación se mejoraron

con un aumento en la dosis de LTAP de alumbre en el lodo mezclado. La presencia de hidróxido de aluminio en el LTAP aumentó la velocidad de sedimentación y deshidratación de lodo biológico de la PTAR. El uso de los LTAP como co-acondicionado y co-eliminación de los desechos, los hace económicamente ventajosos y ayuda en la mejora de la deshidratación de los lodos (Lin et al, 2001; Lai y Liu, 2004).

Sin embargo, teniendo en cuenta las posibles desventajas que pueden ocurrir en lugar de las ventajas potenciales tales como el hecho que es poco probable que una planta de tratamiento de agua de agua potable podría ser instalada en las proximidades de una planta de tratamiento de aguas residuales, el costo y la economía del transporte de lodos / transporte de mercancías podría convertirse en un factor decisivo. La capacidad de control de procesos y de aceptación del lodo son también otros factores importantes (Babatunde y Zhao, 2007).

#### **5.1.1.5. Uso en la construcción de humedales artificiales**

En los últimos años, los humedales artificiales han sido cada vez más usados en todo el mundo como una tecnología alternativa para el tratamiento de aguas residuales (IWA, 2000). Debido a su bajo consumo de energía y su apariencia estética, los humedales artificiales son vistos como una técnica "verde" de tratamiento de aguas residuales. Hoy día el objetivo de las investigaciones en tecnología de humedales es descubrir un nuevo material que aumente la eficacia y reduzca costos. Tradicionalmente, se han utilizado diferentes combinaciones de tierra, arena y grava como los medios sólidos en los humedales. Numerosos estudios han demostrado que los humedales con base en estos medios de comunicación convencionales son capaces de cumplir con el requisito de la reducción de DBO<sub>5</sub> y DQO. Sin embargo, a menudo es difícil de conseguir la eliminación sustancial de ciertos nutrientes inorgánicos como, ortofosfato y nitrógeno amoniacal en medios convencionales.

El uso de los LTAP deshidratados como medio sólido en la construcción de humedales artificiales es una opción interesante. Como los LTAP típicos son

ricos en residuos de aluminio, hierro y calcio, que son fuertes adsorbentes de contaminantes en las aguas residuales, especialmente de fósforo, se ha sugerido su uso en humedales artificiales para reducir la concentración de fósforo. Líder *et al.* (2005) reportaron el uso de lodos de cal y hierro como posibles sustratos de co-tratamiento en humedales, tanto para la industria de productos lácteos como para el tratamiento de aguas residuales municipales. Anteriormente, el lodo deshidratado de alumbre se investigó como potencial adsorbente y/o sustrato en la construcción de humedales, con resultados que indican buena eficiencia en la eliminación de contaminantes estables especialmente para la reducción de fósforo (Yang et al, 2006a; Babatunde y Zhao, 2007).

### **5.1.2. Uso como material de construcción y de la construcción**

Los LTAP también se han estudiado y utilizado como materia prima para la fabricación de materiales de construcción. En otras palabras, para que los lodos puedan integrarse plenamente en la industria de la construcción y para que su uso sea rentable, su composición debe ser estable (Babatunde y Zhao, 2007). De acuerdo con la literatura la fabricación de “ladrillos de lodos” podría ser económica y ambientalmente beneficiosas para la industria. Se ha realizado una cantidad significativa de estudios sobre el tema que nos ayudan a direccionarlo hacia una producción a gran escala para la producción de cemento. De particular preocupación es la variabilidad en el producto final a partir de este tipo de lodos debido a la diferencia en su composición química y al contenido de agua y de materia orgánica. Algunas de sus aplicaciones son:

#### **5.1.2.1. Fabricación de ladrillos**

En la fabricación de ladrillo el factor principal a evaluar es su compresión, debido a los crecientes esfuerzos en esos intentos, los LTAR no han logrado un desempeño satisfactorio. La caracterización de los LTAP se usa para determinar los componentes que pueden afectar el proceso de fabricación de los ladrillos, entre los que se encuentra el contenido de materia orgánica y agua. A partir de entonces, el lodo se adiciona al ladrillo en diferentes niveles

para determinar el porcentaje óptimo de incorporación. Se ha informado un éxito de 100% en ensayos con ladrillos hechos a partir de lodos de abastecimiento de agua en un porción de 80:20 (Goldbold et al, 2003).

De la literatura se puede observar que es más factible producir ladrillos a partir de lodos férricos que de lodos de aluminio, debido a su contenido de hierro y materia orgánica. Horth *et al.* (1994) reportan que hasta un 5 o 10% de adición de lodos férricos a la arcilla en la fabricación de ladrillos produce buen resultado; si se utiliza una mayor proporción de los lodos la calidad del ladrillo se ve afectada especialmente en lo relacionado con su resistencia mecánica y a cambios de temperatura.

Goldbold *et al.* (2003) encontraron que el LTAP, especialmente el férrico, proporciona algunos ahorros de energía en la fabricación de ladrillos, actuando como un agente fundente, al ser utilizado en el horno. El lodo férrico reduce la temperatura de cocción, además de generar ahorro en materia prima como el caso del agua, y la “arcilla” como producto final se obtiene en mejor color y menor proporción. Sin embargo, se observó que el uso de una alta proporción de alumbre a base de LTAP podría producir una disminución en la resistencia a la tracción con una mayor adición de lodos. Anderson *et al.* (2003) incorporaron con éxito una mezcla combinada de un LTAP a base de hierro y cenizas de incineración de LTAR a una mezcla de ladrillo diseñada en base de peso seco del 5%. Se observó poca diferencia en el rendimiento del ladrillo experimental y el control, mostrando que la introducción de los LTAP en la mezcla global de ladrillo tiene poco impacto en las propiedades del producto. Además, no hay niveles de descarga en exceso de los límites específicos.

El uso de LTAP en la fabricación de ladrillos muestra grandes ventajas en el ahorro de materia prima y en el mejoramiento de las propiedades del mismo. Este hecho muestra que una gran alternativa para el uso de los lodos es en la fabricación de ladrillo, teniendo en cuenta que el contenido de hierro de este sea significativo.

### 5.1.2.2. Fabricación de cemento y materiales de cemento

Según lo reportado por Pan *et al.* (2004), el LTAP en teoría no es peligroso, y la composición química de los lodos inorgánicos es similar a la arcilla usada en la producción de cemento. Los autores incorporaron LTAP con éxito en la fabricación de cemento Portland por el proceso de sinterización. La adición de los LTAP en el clinker de cemento aumentó la resistencia a la compresión del hormigón y se benefició la combustión de clinker, sin ningún efecto perjudicial en la propiedad de resistencia a largo plazo. Sin embargo, se observó que los LTAP deseados deberían tener un bajo nivel de cloro, debido a que el cloro podría corroer el horno de cemento y bloquear su conducto (Kikuchi, 2001). El nivel de cloro en el lodo de abastecimiento de agua utilizado fue además 335.5ppm. Carvalho y Antas (2005) en una revisión de estudios sobre la incorporación de lodos en el cemento señalaron lo siguiente:

1. Durante el secado a 105 °C, los lodos sufren aglomeración y se tuvo que moler antes de su uso.
2. Los lodos deshidratados o calentados a 105 °C evitan el fraguado y endurecimiento de la pasta y el mortero.
3. Los lodos tratados térmicamente disminuyen la resistencia a la compresión del mortero, y promueve el aumento de la consistencia.
4. La resistencia a la compresión disminuye con un aumento en el contenido de lodo y temperatura de tratamiento.
5. Los lodos tratados a 700°C indujeron la formación de cal y aluminatos de calcio, que podría haber causado la disminución observada de tiempo de fraguado inicial.

Se concluye que la incorporación de lodos en mortero de cemento sólo podría ser factible a temperaturas por encima de 450 °C, con un aumento del tiempo de fraguado inicial, pero una disminución de la resistencia mecánica. Es

necesario, más investigación para aclarar el efecto específico del componente característico de los lodos en la calidad del cemento y el proceso de configuración y las condiciones de funcionamiento óptimas. Además, parece que no hay una amplia investigación sobre la resistencia a la compresión de tal "cemento de lodo" para que gane aceptación, lo que indica un área de investigación adicional (Godbold et al., 2003). Además, con el fin de determinar la viabilidad comercial completa de tales lodos de cemento, la cantidad de la materia prima disponible y la economía del transporte tienen la misma importancia.

Aunque se señaló por Godbold *et al.* (2003) que los potenciales contaminantes problemáticos tales como fósforo o sulfato en los lodos pueden ser diluidos mediante la mezcla con otras materias primas, todavía hay preocupación por la posibilidad de la inclusión de algunos otros componentes potencialmente nocivos tales como el hierro que pueden producir manchas de óxido, la generación de hidrógeno y la expansión de aluminio, el retraso del proceso de ajuste debido a remoción de zinc y plomo a pH alto (12-14), y la posible expansión de hormigón debido a la reacción álcali-sílice del contenido de vidrio en el material de desecho. Todo esto ha suscitado preocupaciones significativas sobre la posible inclusión de los lodos de PTAR en la producción de cemento y se llegó a la conclusión que la reutilización de los LTAP, especialmente lodos de alumbre puede ser más beneficioso.

### **5.1.2.3. El uso en pavimento y obras geotécnicas**

Aunque está en fase preliminar, sólo se han realizado pruebas piloto, y aún no se ha estudiado ampliamente; se ha reportado la posibilidad de utilizar los LTAP como material de obras geotécnicas (por ejemplo, barreras de contención de residuos, la modelización de suelos, rellenos estructurales) y la incorporación a los materiales de construcción (mezclas bituminosas, material de sub-base de carreteras construcción) y como revestimiento de relleno (Carvalho y Antas, 2005). Esto se basa sobre todo en los resultados preliminares de las pruebas de caracterización de los lodos de abastecimiento de agua a nivel geotécnico y geoambiental que muestra alguna promesa como

un material geotécnico y de construcción adecuada. Carvalho y Antas (2005) examinaron la viabilidad de la incorporación de lodo como material de relleno en mezclas bituminosas para uso en obras de pavimentación. Los lodos deben ser tratados térmicamente a al menos una temperatura de 450 °C para volatilizar los componentes orgánicos. Tal lodo secado térmicamente sufrió aglomeración y había que molerse antes de su uso. Por lo tanto, la necesidad de eliminar los compuestos orgánicos en el lodo puede conducir a la incompatibilidad entre el lodo y material de relleno tradicional. En consecuencia, es deseable una temperatura óptima que maximizaría la eliminación de lodos orgánicos y minimizar la incompatibilidad con materiales de carga tradicionales. Sin embargo, dicho tratamiento térmico puede presentar algunos problemas medioambientales, ya que hay preocupaciones sobre las emisiones malolientes durante el secado térmico. Obviamente, tales emisiones olorosas pueden limitar la aplicación industrial a gran escala del proceso.

Ronald y Donald (1977) también investigaron la viabilidad de la incorporación de lodos en un material de sub-base estabilizado utilizado en la construcción de carreteras. Los resultados muestran que hasta 0,5 a 3% de incorporación de lodo produce un aumento correspondiente 113 a 150 % en la resistencia a la compresión. Raghu *et al.* (1987) también evaluó la viabilidad de la utilización de lodos de abastecimiento de agua como un revestimiento para rellenos sanitarios. El agua se lixivia a través de las muestras y los análisis químicos muestran que la concentración de metales pesados y materia orgánica eran demasiado bajos para crear problemas de contaminación.

### **5.1.3. Aplicaciones en tierra**

#### **5.1.3.1. Lodos de aguas blandadas para ajuste de Ph**

La aplicación en tierra más notable de los LTAP es el uso de lodos de cal para ajuste de pH, como un sustituto de la piedra caliza agrícola (Basta, 2000; Titshall y Hughes, 2005). Las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos se pueden utilizar para asimilar los residuos aplicados sin efectos

adversos sobre la calidad del suelo e incluso con la posibilidad de mejorar su calidad. En comparación con la opción de relleno de tierras, las aplicaciones en tierra son vistas como una alternativa favorable y de bajo costos, lo cual no necesariamente puede requerir permisos reglamentarios, aunque puede ser necesaria una considerable área de tierra. El alcance de este tipo de aplicaciones ha sido un medio sostenible para la disposición de lodos de aguas, también se ha mejorado o reclamado ciertas cualidades del suelo o usos como medio de cultivo para los cultivos. Sobre la base de esta revisión, tres factores principales son cruciales para el éxito de las aplicaciones terrestres (Babatunde y Zhao, 2007):

1. Determinar el tipo de aplicación efectiva óptima con el mínimo de consecuencias.
2. Las características especiales de los lodos.
3. La intención exacta de la aplicación.

#### **5.1.3.2. Para la mejora estructural del suelo**

Los LTAP, debido a sus propiedades alcalinas, pueden ser usados como acondicionadores para suelos mejorando muchas de sus propiedades, es así como Dayton y Basta (2001) observaron que los LTAP podría ser usados como sustitutivos del suelo, ya que contienen sustancias húmicas y sedimentos del agua cruda. En otros casos, se han hecho intentos de reutilizar LTAP como fuente de biofertilizante, aunque existen preocupaciones por la falta de potasio y otros nutrientes en el lodo, lo que hace que sea incomparable con fertilizantes de calidad comercial. Sin embargo, los niveles de metales limitantes en el LTAP son importantes para la aplicación de la tierra a largo plazo, ya que determina la vida útil de estos sitios de aplicación sobre la base de las cargas de metales acumulados (Elliot y Dempsey, 1991).

Los métodos utilizados incluyen la aplicación en tierras para cultivo, la regeneración de las zonas de minas a cielo abierto y el uso como material de cubierta para vertederos. Sin embargo, es importante modificar tales

aplicaciones terrestres para inducir favorablemente las propiedades del suelo y reciclar los componentes valiosos de lodos. De lo contrario, la aplicación no controlada puede conducir a efectos adversos e indeseables en las propiedades típicas de suelos. Si bien algunos estudios han reportado considerables mejoras en la calidad de los suelos típicos como la retención de agua y pH, y por extensión, un buen crecimiento del cultivo (Moodley y Hughes, 2005; Pecku et al, 2005), otros han observado algunos efectos indeseables (Owen, 2002). Típicamente, la disponibilidad de fósforo en el suelo se reduce de manera significativa a tasas de aplicación de lodos por encima de 10% (Dayton y Basta, 2001).

Owen (2002) informó el resultado de una aplicación de prueba de lodos férrico a tierras agrícolas y recomendó el lodo férrico como beneficioso para los pastizales y la producción agrícola ganadera, siempre que las tasas de aplicación cumplen con las regulaciones. En particular, los posibles efectos adversos de los metales de lodos transmitidos en los cultivos y los suelos podrían ser mínimos, tanto que tales efectos son dependientes del pH (Elliot y Dempsey, 1991).

En un estudio sobre los efectos de la adición de LTAP sobre la estructura del suelo, Pecku *et al.* (2005) también reportaron que la respiración basal del suelo fue influenciado en gran medida y se incrementó dentro de un cierto rango de aplicación de lodos de aguas, con un cambio asociado en la estructura de la comunidad microbiana del suelo.

Hyde y Morris (2004) observaron que la modificación de los lodos de abastecimiento de agua con el fósforo antes de la aplicación a las tierras agrícolas puede eliminar el problema de las deficiencias de P en el crecimiento vegetal. Por lo tanto, se modificaron los LTAP con el fósforo en dosis de 0,0-77.4 g P / Kg de lodos y se comparan con la aplicación de fertilizantes equivalente. Se encontró que tasas entre 14,6 y 19,4 g P/kg de lodos fueron suficientes.

### **5.1.3.3. Como tampón de los suelos**

En particular, para el acondicionamiento del suelo y ajuste del pH se han utilizado los lodos que contienen cal. Dayton y Basta (2001) informaron que los LTAP pueden ser eficaces para encalado y esto fue corroborado por los resultados de Rensburg y Morgenthal (2003), en la que los lodos de obras hidráulicas se utilizaron eficazmente como mejoradores de residuos mineros generadores de ácido.

Elliot y Dempsey (1991), señalan que la mayoría de los lodos de la coagulación tienen capacidad limitada para servir como materiales de encalado agrícola debido a su equivalencia de carbonato de calcio que oscila generalmente entre el 10-20% de piedra caliza comercial, en contraste con el carbonato de calcio de los LTAP con cal que es típicamente 80-103%. En cualquier caso, el refinamiento del volumen de aplicación podría ser necesario para diferentes tamaños de partícula y la posibilidad de micronutrientes por encima de un cierto rango. Además, las concentraciones de magnesio elevadas, contribución del calcio a los desequilibrios de magnesio y el aumento de la salinidad del medio de encalados, son el crecimiento factores químicos potenciales que se observaron limitantes (Babatunde y Zhao, 2007). Goldbold *et al.* (2003) informaron que el lodo de abastecimiento de agua acondicionado con cal resultó beneficioso para el crecimiento de plantas y se concluyó que el aumento resultante en el pH del suelo compensa cualquier disminución de la disponibilidad de fósforo y además, la lixiviación de aluminio a partir de suelo ácido modificado con alumbre fue insignificante en los valores típicos de pH agrícolas.

### **5.1.3.4. Reducción de nutrientes en los suelos cargados y escorrentías**

Uno de los principales objetivos en la recuperación de suelos agrícolas, es remediar suelos cargados con fósforo y evitar la pérdida de fósforo por escorrentía. La capacidad de fijación de fósforo en los LTAP, se debe al contenido de óxidos hidratados de los lodos. Se han manifestado

preocupaciones en el caso de la fitotoxicidad del aluminio inorgánico y la fijación de fósforo disponible en las plantas (Elliot et al, 2002). Otra preocupación ambiental es un nivel alto de aluminio en los suelos conduciendo a la fitotoxicidad y generación de  $\text{NO}_2\text{-N}$  en ciertos casos (Dayton y Basta, 2001).

Sigue siendo necesaria una amplia investigación para establecer la tasa de aplicación del umbral de los lodos de abastecimiento de agua, que no perturbe el ciclo del fósforo del suelo o de la tierra, teniendo en cuenta que los lodos de abastecimiento de agua puede diferir sustancialmente en sus máximos de fósforo, debido a la variación en las concentraciones de oxalatos en el Al y Fe extraíbles (Elizabeth, et al., 2003; Novak y Watts, 2004).

Peters y Basta (1996) informaron, además, que no hubo aumentos excesivos en la salinidad del suelo y metales pesados extraíbles en los suelos. Tal vez, en algunos casos, la tendencia en alcalinidad de los lodos, particularmente lodos de alumbre afecta el pH del suelo, aumentando el nivel de pH favoreciendo la insolubilidad del Al (Gallimore et al., 1999), el tratamiento alcalino de lodos a base de aluminio de un suelo ácido cargado de nutrientes aumentó el pH del suelo de 5,3 hasta 7; mientras que el tratamiento de la misma tierra con otro lodos de abastecimiento de agua a base de aluminio (pH 7,0) aumentó el pH desde 5,3 hasta 5,6. No hubo elevada concentración de aluminio y se razonó que, dado que existe aluminio en los LTAP como una forma insoluble de óxido de aluminio, es poco probable que se disuelva en ambientes de suelos que no son fuertemente ácidos ( $\text{pH} > 5$ ).

Los LTAP son considerados no nocivos para la salud y tienen múltiples aplicaciones, que hacen parte de un afán social por solucionar un problema ambiental. La mayoría de sus aplicaciones busca su aprovechamiento sin realizar un proceso de estabilización, a diferencia de los LTAR que necesitan obligatoriamente ser tratados antes de realizar una aplicación de ellos. Debido a su baja contaminación, o una contaminación controlada de estos lodos, pero que de igual forma contribuye a una afectación a nivel de salubridad y ambiental. Es importante tener en cuenta a la hora de realizar una aplicación de los diferentes lodos obtenidos de las plantas de tratamiento de agua

potable, su contenido químico, que ayudaron en el tratamiento del agua, ya que este contenido define un perfil de aplicación del mismo.

## **5.2. USO DE LODOS PROVENIENTES DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL**

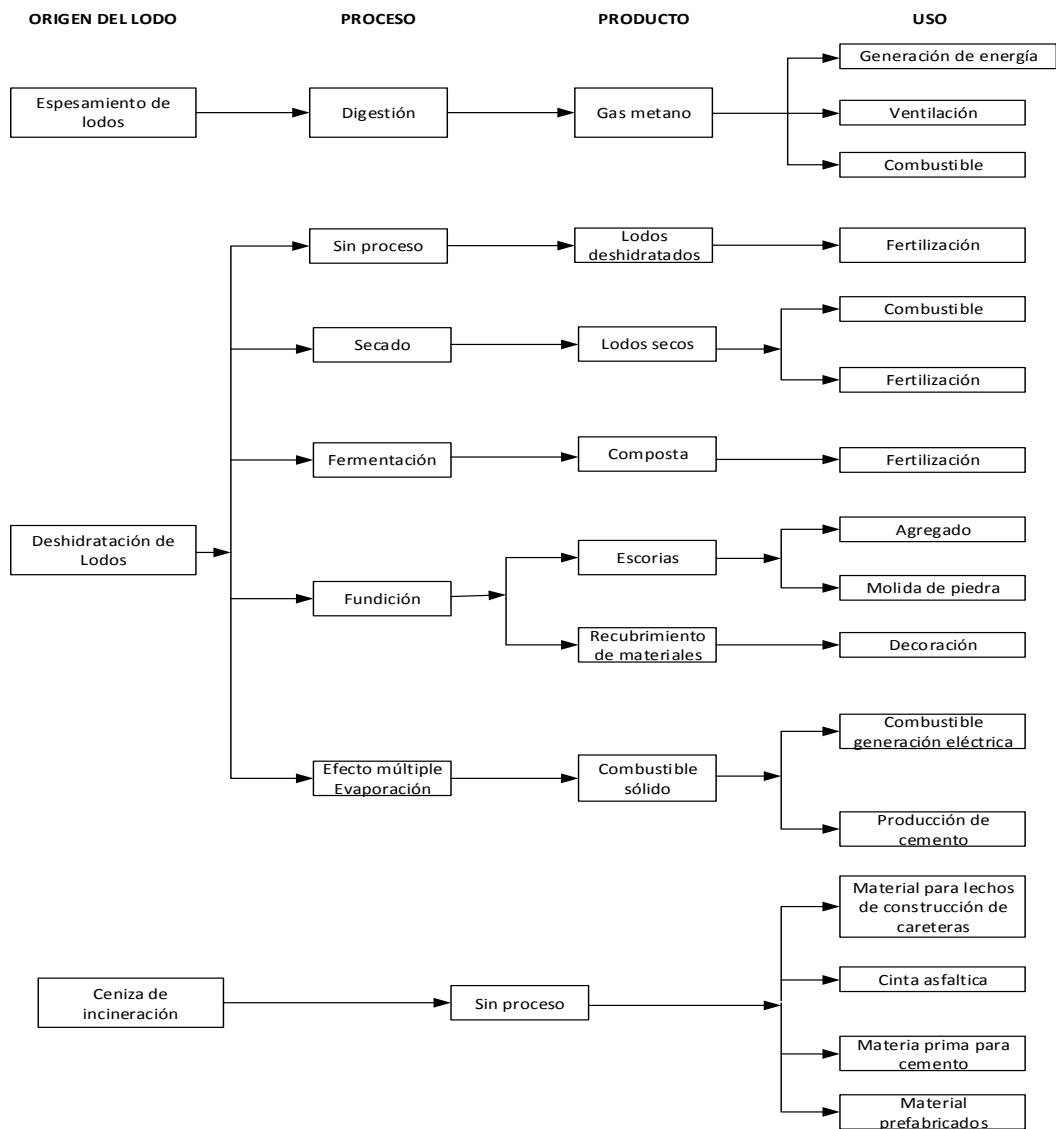
Un sistema de tratamiento de aguas genera como producto final el agua tratada y un residuo semi-sólido o lodo, con una serie de contaminantes originados por el tratamiento que se lleva a cabo para el proceso, y las condiciones de operación del sistema.

Durante el tratamiento se separan la fase líquida de la sólida. El líquido se descarga al ambiente, mientras los sólidos son retirados para su tratamiento y disposición final. Los principales contaminantes son metales pesados y microorganismos patógenos. Hace algunos años era muy común que dichos lodos se destinaran a algún fuente hídrica, práctica prohibida a partir del año 1987 mediante el acuerdo de Helsinki (Castillo et al., 2007). Los lodos son de los componentes eliminados los de más grande volumen, su manipulación y técnicas de eliminación son una preocupación. Al hablar de un manejo sostenible de los lodos, debe cumplirse con los requisitos de reciclado eficiente de los recursos y el suministro de sustancias nocivas para el ser humano o el medio ambiente (Fytili y Zabaniotou, 2008).

La WEF (1993) es la normatividad que regula la calidad de los lodos finales más amplia y profunda encontrada. Donde basada en criterios de reducción de patógenos, clasifica el lodo en Clase A o clase B, según corresponda. Normatividad que regula y define la aplicabilidad o disposición final de los lodos generados en las PTARs.

Con los avances en conocimiento de diversas técnicas, surgen alternativas (Figura 13.) para el tratamiento de lodos y la generación de subproductos que pueden ser aplicados para diversos usos, principalmente en áreas como la construcción, la agricultura, la generación de energía e inclusive en decoración (Nolaya et al., 2000).

**Figura 13. Usos de lodos residuales con base en su origen y los productos obtenidos de diversos procesos**



Fuente: (Nolaya et al., 2000).

A continuación se profundizará sobre algunas de estas técnicas:

### 5.2.1. Aprovechamiento térmico:

Con el aprovechamiento térmico, se busca utilizar la energía almacenada en los lodos para minimizar los impactos ambientales. Debido al alto contenido de humedad del lodo, la energía liberada durante los procesos térmicos se

consume para reducir la cantidad de humedad (Dennis et al., 2005). El principal problema del aprovechamiento térmico incluye (Khiari et al., 2004):

- a. Energía excesiva, necesaria para alcanzar altas temperaturas.
- b. Altos costos de capital
- c. La necesidad de un amplio equipamiento debido a la contaminación del aire.

Los lodos pueden ser aprovechados como fuente de energía durante su tratamiento con digestión anaerobia en la cual se produce biogás, que a su vez puede darse para producir energía eléctrica y calorífica.

Se han identificado 5 tecnologías desarrolladas en el mercado para el tratamiento térmico de los LTAR entre ellas:

#### **5.2.1.1. Co- Combustión**

La mono y co-combustión son los procesos predominantes en el mercado para el aprovechamiento de los LTAR, dentro de los más utilizadas se encuentran los hornos de solera y de lecho fluidizado (Fytili y Zabaniotou, 2008). La diferencia entre los dos tipos de hornos es que el horno de solera quema de manera mecánica los lodos deshidratados (en húmedo). Los hornos de lecho fluidizado pueden quemar lodos tanto húmedos y/o semi-secos, con contenido de materia seca en el intervalo de 41-65% en peso.

Los mecanismos de la combustión deben ser conocidos, antes de hacer cualquier predicción de los resultados potenciales. Debido principalmente a que los lodos presentan características totalmente diferentes a las características del carbón a las mismas condiciones, cuando se están quemando. Los LTAR tienen un máximo de 80% en peso de contenido de humedad, 50% en peso como masa seca, el 90% en peso de compuestos volátiles (masa seca y libre de ceniza) e inferior al 10% en contenido de carbono (Hein y Bemtgen, 1998).

Los parámetros que pueden afectar el proceso de combustión de LTAR son: el secado de lodos, la liberación y la combustión de los volátiles, la combustión del alto contenido de ceniza restante y char.

Teniendo en cuenta la Tabla 3, sobre la composición de lodos de aguas residuales, la combustión de estos lodos puede ser vista como una fuente de contaminación y hay que tener cuidado durante su evacuación. Además la liberación de metales pesados, el manejo de residuos sólidos como la cama y la ceniza de filtrado y las emisiones de dioxinas y furanos  $\text{NO}_x$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{SO}_2$ , como de HCl, HF y  $\text{C}_x\text{H}_x$ , son de importancia para la salud pública (OMS, 1989).

La mayor preocupación de la combustión de los lodos, es la liberación de contaminantes gaseosos y sólidos a la atmósfera. Problemas relacionados con la eliminación de cenizas y la lixiviación de los metales pesados, pueden ser manejados con aumento de la temperatura durante la combustión e incluso utilizar la gasificación. Sin embargo, los metales pesados siguen siendo un problema en los hornos de lecho fluidizado convencionales (Fytili y Zabaniotou, 2008).

Las emisiones de mercurio, dioxinas y furanos, son controlables (Fytili y Zabaniotou, 2008); utilizando el estado del arte de nuevas tecnologías. A pesar del contenido de nitrógeno, la relación de conversión de combustible N de  $\text{NO}_x$  es inferior al 5%, y las emisiones netas totales de  $\text{NO}_x$  se encuentra en niveles muy bajos (Fytili y Zabaniotou, 2008).

#### **5.2.1.2. Oxidación húmeda**

La oxidación húmeda de los LTAR se lleva a cabo en una fase acuosa a temperaturas de 15-330°C y presiones de 1-22 MPa utilizando oxígeno puro o atmosférico. Se necesita una alta temperatura para evitar la ebullición a las temperaturas requeridas por el proceso (Hall, 1995). Durante el proceso, el contenido de materia orgánica de los lodos se degrada térmicamente, hidroliza, oxida y convierte en dióxido de carbono, agua y nitrógeno. Todo el proceso tiene lugar en dos regímenes diferentes (Werther y Ogada, 1999):

- Primero se produce en condiciones sub-críticas, por debajo de 374°C y una presión de 10 MPa.
- Segundo en condiciones supercríticas por debajo de 374°C y una presión de 21.8 MPa.

Esta tecnología ha sido aplicada en Apeldoorn, países bajos, específicamente.

### **5.2.1.3. Pirolisis**

La pirolisis es el proceso a través del cual, las sustancias orgánicas se descomponen térmicamente en una atmósfera libre de oxígeno, a temperaturas que varían en el rango de los 300 a 900°C. La pirolisis consiste en calentar los lodos en una atmósfera inerte, donde ocurre una liberación de la materia orgánica y su potencial de reciclaje. Esta técnica parece ser menos contaminante que los métodos convencionales de incineración y combustión. Debido a que concentra los metales pesados en forma de un residuo sólido carbonoso, por lo que su lixiviación no es tan crucial como en las cenizas que se generan en incineración (Menéndez et al., 2002).

Las relaciones presentes en el craqueo térmico y condensación. En comparación con el proceso de combustión, son altamente exotérmicas, la pirolisis es endotérmica, en el orden de 100KJ/kg (Khiari et al., 2004). Los lodos en una atmósfera inerte o de vacío presentan tres fases luego de la degradación térmica (Fytili y Zabaniotou, 2008):

1. Fracción gaseosa, gas no condensable (GNC) que contiene hidrogeno, metano, monóxido de carbono, dióxido de carbono, y otros gases en concentraciones más pequeñas.
2. Fracción líquida, compuesta de alquitrán y/o aceite, que contiene sustancias tales como ácido acético, acetona, y metanol.
3. Fracción sólida, que se compone de carbón principalmente, la mayoría de veces carbón puro, con pequeñas cantidades de materiales inertes.

La proporción de cada una de las fases depende de la temperatura, el tiempo de residencia en el reactor, la presión, la turbulencia, y también de las características del efluente. El gas de pirolisis se puede utilizar como combustible, así como el carbón, y su aceite se puede utilizar como materia prima para las industrias químicas, incluso también como combustible. Se ha encontrado que hay diferentes temperaturas en las que las sustancias químicas se descomponen, y se citan a continuación en la Tabla 10 (Shinogi y Kanri, 2003).

**Tabla 10. Rangos de temperatura para diferentes sustancias a descomponer**

<b>Compuestos</b>	<b>Rango de temperatura (° C)</b>
<b>Humedad</b>	Hasta 150
<b>Carboxílicos</b>	150-600
<b>Fenólicos</b>	300-600
<b>Oxígeno del éter</b>	Hasta 600
<b>Celulósico</b>	Hasta 650
<b>Compuestos que contienen oxígeno</b>	150-900

Fuente: (Shinogi and Kanri, 2003)

Después de realizado un proceso de pirolisis a los LTAR, se pueden buscar varias alternativas para un manejo eficiente y sostenible con el ambiente, como la alternativa de ser utilizado como carbón activado ayudando dentro de la gama de los adsorbentes, tras un estudio de las condiciones a las que se debe someter.

#### **5.2.1.3.1. Adsorbentes alcalinos a partir de lodos generados del tratamiento de aguas residuales**

Los lodos residuales son una prometedora materia prima para la producción de adsorbentes. Su transformación representa una alternativa atractiva para la eliminación de lodos y su reutilización. Sin embargo, las propiedades de los adsorbentes han demostrado ser dependientes tanto del método de

producción/conversión como la naturaleza de los lodos. Se encontró que la activación química usando reactivos de hidróxido de metal alcalino, especialmente KOH, es una técnica eficaz para la producción de una gran área superficial, áreas de formación de 1800 m<sup>2</sup>/g. La carbonización y activación física, por otro lado, no da áreas superficiales altas como consecuencia del alto contenido inorgánico de los lodos. Sin embargo, este inconveniente es superable, en primer lugar, por la dilución de los lodos con bajo contenido de cenizas, materiales carbonosos y en segundo lugar, por el lavado con HCl, que por su disolución parcial sirve para reducir el contenido inorgánico (Smith et al., 2009).

El carbón activado es uno de los adsorbentes más eficaces utilizados en la purificación de las aguas. La obtención de éste a partir de la pirólisis de lodos residuales, evidencia que falta mucho por conocer antes de lograr una aplicación a gran escala. Como nuevo material, se tiene que estandarizar el proceso de pirólisis, evaluar las características del carbón activado como adsorbente, estudiar y modelar el equilibrio de adsorción, así como la cinética en un proceso dinámico (Colín et al., 1989).

Sin embargo, Colín *et al.* (2007), caracterizó mediante análisis químico El Carbón activado proveniente de la pirolisis de los lodos residuales (CAG-PPLR), determinando el área superficial específica, tamaño de partícula y tamaño de poro, así como la realización de análisis térmicos para conocer la variación en masa con relación a la temperatura. Para determinar la capacidad de adsorción en la matriz inorgánica y en la matriz orgánica, se estudió primero la cinética de adsorción para cada uno de los contaminantes -modelo-. Como conocer el tiempo requerido para alcanzar el equilibrio. Del estudio se concluyó que El CAG-PPLR posee una capacidad de adsorción comparable a la de un carbón activado comercial a ambas temperaturas (20 y 40 °C) y tres niveles de pH (2, 4 y 6) estudiados. A pH = 6 y 20 °C, las capacidades de adsorción es alta, esto se debe fundamentalmente al tipo de especies químicas formadas en estas condiciones y que precipitan, según los diagramas de especiación química (Colín, 2007).

Se espera que esta alternativa de producción de adsorbentes, especialmente carbón activado sea evaluado y estudiado con mayor profundidad, para obtener resultados confiables y se logre una efectiva aplicación de dicha técnica. Siendo una de las mejores alternativas para aplicación de los LTAR.

#### **5.2.1.4. Gasificación**

La gasificación es el proceso térmico mediante el cual el contenido carbonoso de los lodos de PTAR se transforma en gas combustible y cenizas bajo una atmósfera reductora neta. Por otra parte, se puede afirmar que los objetivos óptimos de gasificación de lodos de PTAR son la producción de gas limpio combustible a alta eficiencia. En comparación con la incineración, la gasificación, debido al hecho que es un proceso químicamente reductor, puede evitar que ocurran problemas, incluyendo la necesidad de combustible suplementario, las emisiones de óxido de azufre, óxidos de nitrógeno, metales pesados y las cenizas y el potencial de producción de cloro se vuelven dibenzodioxinas y dibenzofuranos (Marrero et al., 2003).

Marrero *et al.* (2003), consideran la gasificación como serie de sub-procesos térmicos químicos. Durante el proceso de gasificación, lodos de aguas residuales se someten a un cambio físico y químico complejo, comenzando con el secado o la eliminación del agua contenida como humedad. El lodo de aguas residuales seca, se piroliza o descompone térmicamente. En el paso final, los productos de la pirolisis, los vapores condensables y no condensables y char se someten a gasificación, donde se oxidan simultáneamente y luego se reducen a los gases permanentes en la zona de reducción. En la zona de secado, los lodos de aguas residuales descienden en el gasificador y la humedad se evapora mediante el calor generado en las zonas de abajo. La velocidad de secado depende de la superficie del combustible, la velocidad de recirculación, la humedad relativa de estos gases y las diferencias de temperatura entre la alimentación y los gases calientes, así como la difusividad interna de la humedad dentro del combustible. Característicamente, los lodos

con menos de 15% de humedad pierden toda la humedad en esta zona (Dogru et al., 2002).

En el trabajo experimental realizado por (Dogru et al., 2002), se muestran las concentraciones típicas de los gases combustibles producidos durante la gasificación (Tabla 11).

**Tabla 11. Composición típica combustible gas procedente de la gasificación (% vol)**

Constituyentes de gas	% [vol]
El monóxido de carbono, CO	6,28-10,77
El hidrógeno, H <sub>2</sub>	8,89-11,17
El metano, CH <sub>4</sub>	1.26 a 2.09
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0,15-0,27
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	0,62-0,95

Fuente: (Dogru et al., 2002)

Los metales pesados presentes en los lodos de PTAR se acumulan, haciendo su disposición problemática. Por lo tanto es importante determinar la disposición final. En la gasificación, los metales pesados pueden ser tratados en las siguientes fases del proceso:

- a. En el gasificador (también es tratado el residuo carbonoso).
- b. En el condensado.
- c. En el filtro de carbón de leña.

Donde el estudio de (Marrero et al., 2003) ha llegado a las siguientes conclusiones:

- Cd, Sr, Cs, Co y Zn están completamente retenidos por el carbón en el gasificador.
- Se moviliza un porcentaje muy pequeño de Cu, la mayor parte del cual es retenido en el condensado y el filtro de carbón de leña de los lodos.

- Se moviliza Arsénico en una pequeña pero significativa medida.
- El mercurio es el metal más móvil, retenido por el filtro de carbón.

Durante el proceso, se genera gran cantidad de aerosoles, dando lugar a problemas con algunos elementos volátiles que entran en la fase de vapor. El arsénico es probable que sea uno de estos elementos. Las mediciones se obtuvieron mediante la lixiviación con ácido nítrico al 50%. El arsénico presenta la retención de más de 50% (Fytili yZabaniotou, 2008). Siendo de esta forma el proceso de gasificación, un proceso compuesto de otros procesos para lograr la efectividad en cuanto al tratamiento y aplicación de los LTAR.

#### **5.2.1.4.1. Producción de hidrogeno a partir de los lodos generados del tratamiento de agua residual**

Los LTAR húmedos son la materia prima más común usada en la fabricación de hidrógeno en todo el mundo (Dogru et al., 2002). Los procesos involucrados en la producción de hidrógeno a partir de los residuos se asemejan a los proceso en la producción de combustibles fósiles. En virtud de las altas temperaturas, los residuos se descomponen a gas. El gas se compone principalmente de H, CO y metano (CH<sub>4</sub>). El vapor se introduce para reformar CH<sub>4</sub> a H<sub>2</sub> y CO. El CO se lleva a través de un proceso de cambio para alcanzar un nivel más alto de hidrógeno. El subproducto de este proceso es el CO<sub>2</sub>, pero el CO<sub>2</sub> a partir de biomasa se considera “neutral” con respecto a gases de efecto invernadero, ya que no aumenta la concentración del CO<sub>2</sub> en la atmósfera (Fytili y Zabaniotou, 2008).

Casi todo el hidrógeno producido en la actualidad está formado a partir de vapor de gas natural. Reino Unido y Turquía han investigado el potencial de producción de hidrógeno a partir de lodos de PTAR, mediante aplicación de la técnica de gasificación (Mathieu y Dubuisson, 2002).

Comparando el proceso de gasificación para la producción de hidrogeno con otras tecnologías para la producción de energía eléctrica a partir de residuos, son preferibles los sistemas de células de combustible de gasificación. Es

posible una eficiencia eléctrica superior al 30%. (Fytily y Zabaniotou, 2008; Morishita et al., 2001).

#### **5.2.1.5. Uso de lodos de generados en el tratamiento de aguas residuales en la elaboración del cemento y ladrillo**

##### **5.2.1.5.1. Co-combustión de lodos generados en el tratamiento de aguas residuales, para la fabricación de cemento**

Los combustibles tradicionales utilizados en el proceso de fabricación de cemento son gas, petróleo o carbón. Otras alternativas pueden ser materiales como aceites usados, plásticos, restos de automóviles, neumáticos inservibles y LTAR (Kääntee et al., 2004). Para utilizar esta clase de combustibles en una fábrica de cemento, la composición del combustible debe ser conocida con precisión. Las decisiones en cuanto al uso final del combustible, se basa en varios criterios, entre ellos el precio y la disponibilidad, el contenido de energía y cenizas, el contenido de humedad y volátiles. Kaante *et al.* (2004). en su trabajo, recomiendan como regla general que la velocidad máxima de alimentación de los LTAR no debe ser superior al 5% de la capacidad de producción del Clinker de la planta de cemento. En consecuencia, para un horno de cemento 2000 t/día, se podría utilizar un máximo de 100 t/día de lodo seco (Kääntee et al., 2004).

Realizando un análisis del consumo de energía primaria en un proceso en seco de un Planta típica de Cemento Portland, se compone de hasta un 75% del consumo de combustibles fósiles y hasta un 25% del consumo de electricidad. Dentro de la categoría de combustible para piropcesamiento se requiere un 99%, mayor cantidad de energía, mientras que la electricidad se utiliza principalmente para operar con un 33% de materia prima y un 38% de trituración en el clinker y equipos de molienda. Además, se necesita electricidad para el piropcesamiento (22%) por lo que se requiere mayor cantidad de energía para la mayor parte del proceso de producción (Valls y Vazquez, 2000).

#### **5.2.1.5.2. Uso de los lodos generados en el tratamiento de aguas residuales en la producción de cemento y ladrillo**

Estudios realizados en Taiwán, demuestran que 34 plantas de tratamiento de aguas residuales industriales tienen una producción anual de aproximadamente 0,67 millones de toneladas de lodos (Chih-Huang, 2003). La utilización de los lodos como materia prima en la construcción y materiales similares al cemento, es una muy buena alternativa de re-uso de los lodos, ya que, no sólo convierte los desechos en materiales útiles sino también aliviana el problema de su eliminación.

La ceniza de los LTAR resultante de la incineración se pueden utilizar en mejora de ciertas propiedades de los materiales de construcción (Kääntee et al., 2004). Los LTAR se han utilizado para la fabricación de ladrillos, se han incorporado en mezclas de hormigón y como agregado fino en morteros. Varias aplicaciones se han llevado a cabo en este campo. Es necesario analizar características como: el origen de los lodos, materiales utilizados, y la compatibilidad de los lodos dentro de la matriz de cemento y la producción de especímenes. Las materias primas para la producción de cemento son Piedra caliza u otra fuente de  $\text{CaCO}_2$  (aproximadamente 80-85% de la entrada), arcillas (aproximadamente el 15-29% de la entrada); varios otros materiales para proporcionar si es necesario, Fe y Al (Kääntee et al., 2004). El proceso consta de los siguientes pasos:

- La mezcla y la molienda de los materiales anteriormente mencionados.
- Calentamiento en un horno de cemento para producir Clinker.
- Puesta a tierra de Clinker.
- Adición de otros minerales (alrededores del 10-20% de la masa)
- La producción de cemento.

Monzó *et al.* (2003) realizó estudios sobre el efecto de LTAR en los morteros de cemento, a partir de la descarga de un incinerador de lecho fluidizado. Se observó una reducción no lineal de trabajo en morteros que contienen LTAR,

sin embargo, esta reducción pierde importancia cuando se aumentó el contenido de LTAR en los morteros. Se concluye que hay una disminución de trabajo de un mortero, cuando se lleva a cabo la sustitución parcial del cemento, situación que puede ser explicada por la morfología irregular de las partículas de los LTAR y la alta absorción de agua en la superficie de las partículas de los LTAR. También se afirma que los LTAR se comportan como material activo, cabe señalar que el alto contenido de azufre de los LTAR ( $\%SO_2 > 10$ ) parece tener poca influencia en la resistencia de compresión de los morteros (Monzó et al., 2003).

Las operaciones que generan emisiones en una planta de cemento son: la explotación de las canteras, cribado, trituración y molienda, la carga de materia prima y descarga para almacenamiento, incluyendo la pila de almacenamiento (Cenni et al., 2001).

El uso de los lodos residuales como materia prima en la fabricación del cemento, debe también estudiarse a profundidad. Detallando las características y propiedades que pueden adquirirse o mejorarse con la aplicación de estos lodos en la industria del cemento. Se han evidenciado la modificación de ciertas propiedades como la disminución de trabajo en el mortero, y el aumento de este adicionando mayor cantidad de lodos en la composición de la mezcla para la fabricación del cemento.

Utilizar los lodos generados de las PTAR en la fabricación de ladrillo al igual que en el cemento es una alternativa viable para su aplicación. Las condiciones para la fabricación de ladrillos de buena calidad es de un 10% en contenido de lodo con un 24% de contenido de humedad a una temperatura entre 880-960°C (Chih-Huang, 2003). Una de sus ventajas es la eliminación de patógenos por las altas temperaturas a las que es sometido en el horno. Debe realizarse un mayor estudio de las propiedades de este, debido al gran uso y necesidad de materia prima solicitada por esta industria.

### **5.2.2. Uso de los lodos generados en el tratamiento de aguas residuales para acondicionamiento del suelo**

Los LTAR contienen nutrientes esenciales como N y P gracias a su origen fecal, u es potencialmente beneficioso como abono para plantas. El carbono orgánico en el lodo, una vez estabilizado, es también deseable como un acondicionador de suelo, ya que proporciona una mejor estructura del suelo para las raíces de las plantas (UNEP, 2014). La aplicación del llamado también biosólido en el suelo es frecuente en silvicultura (plantaciones forestales o viveros), recuperación de suelos degradados, adecuación de zonas verdes, abono o enmienda orgánica y como biorremediación de suelos contaminados (Sogaard et al., 2002). La potencialidad de uso depende del tratamiento previo y del tipo de cultivo donde se apliquen. Los cultivos sobre el suelo y de consumo directo sin procesamiento previo presentan las mayores restricciones por el riesgo de presencia de patógenos.

La volatilización del nitrógeno es la pérdida más significativa durante el proceso de incorporación de biosólidos como fertilizante en el suelo. Este proceso depende de la temperatura, el pH del suelo, la capacidad de intercambio catiónico, el contenido de materia orgánica, la cobertura y la calidad de residuos en la superficie, el viento, la tensión de vapor superficial y la dosis aplicada. Ferraris *et al.* (2009) y Hoit *et al.* (2003) observaron que la aplicación de biosólidos municipales sin higienizar a razón de 5.6% en volumen favoreció el crecimiento de 40 especies de plantas, entre ellas el rábano rojo (*Raphanus sativa*); por el contrario, Evanylo *et al.* (2006) y Lopes, (2008) no encontraron cambios en el desarrollo y producción de rábano con la aplicación de diferentes dosis de biosólidos en el suelo.

La aplicación a largo plazo de tales enmiendas del suelo a menudo conduce a niveles de nutrientes del suelo (P y N) en exceso de los requeridos por los cultivos, y por lo tanto se convierte en una fuente potencial de fugas de nutrientes a los cuerpos de agua, lo cual no es deseable. Sharpley *et al.* (1994) observaron que la aplicación de estiércol animal en cantidades que excedan las posibilidades agronómicas en el requerimiento de N para el crecimiento de

determinado cultivo, resulta en la mayoría de los casos en una pérdida de P de las tierras agrícolas por escorrentías de superficie y potencial eutrofización de las aguas superficiales. Se ha demostrado que la camada de aves de corral, cuando se utiliza como una fuente de fertilizante de bajo costo para mejorar la calidad del suelo, también aumenta la concentración de  $\text{NH}_4$  además de P en escorrentías de superficie (Liu et al, 1997; Sharpley, 1997; Gallimore et al 1999; Babatunde y Zhao, 2007).

Esto ha llevado a aplicar a la tierra modificaciones variadas de los nutrientes en los suelos y biosólidos, y escorrentías de dichas tierras, tales como el uso de sales de aluminio, hierro y calcio para disminuir la solubilidad de P en el estiércol de las aves de corral y la escorrentía de suelos de estiércol (Moore y Miller, 1994).

Es importante tener en cuenta que los lodos estabilizados o biosólidos, también pueden ser utilizados como mejoradores de suelo en la agricultura. Debido a sus ventajas, los biosólidos pueden utilizarse como sustituto de fertilizantes químicos. Pero también hay que tener presente que antes de realizar un aprovechamiento de los biosólidos en esta área, se deben tener en cuenta aspectos de salubridad.

### **5.2.3. Producción biológica de hidrogeno.**

La producción biológica de hidrógeno a partir de la materia orgánica es considerada una de las alternativas más prometedoras para la producción sostenible de energía verde. La producción biológica de hidrógeno, se da por medio del proceso de fermentación oscura, proceso en el cual las bacterias anaerobias utilizan compuestos orgánicos para producir hidrogeno en ausencia de luz. Este proceso tiene otros beneficios ambientales como el uso de materiales de desechos orgánicos como fuente de carbono bruto. Además, al ser combinado con la digestión anaerobia metanogénica, resulta de manera adicional la producción de energía verde (Zhu y Béland, 2006).

Las bacterias capaces de producir hidrógeno son principalmente *Clostridium*, *Escherichia coli* y *Enterobacter* (Das y Veziroglu, 2001). Estas bacterias existen ampliamente en entornos naturales como los sedimentos, suelos, lodos de aguas residuales, compost y estiércol. La preparación de las semillas para la producción de hidrógeno generalmente incluye la selección de bacterias. El enriquecimiento de bacterias productoras de hidrógeno y la aclimatación de las bacterias a los sustratos específicos a través del cultivo bacteriano (Zhu y Béland, 2006). Sung *et al.* (2002) informan de un tratamiento térmico repetido de lodos para la producción de hidrógeno usando un medio de sacarosa.

Los lodos procedentes de una planta de tratamiento de aguas residuales municipal fueron neutralizados antes de la inoculación en un reactor de lecho fijo con HCl (pH 3-4) durante 24 h usando un medio de sacarosa. Wang *et al.* (2003) utiliza ácido 2-bromoethanesulfonic (BESA) (100 mmol) para matar las bacterias metanogénicas en los lodos después de la pasteurización a 121°C durante 30 min con el fin de aislar cepas puras de *Clostridium* para la producción de hidrógeno. Para el procedimiento se utilizaron sustratos como glucosa, sacarosa, celulosa, residuos sólidos municipales y LTAR. De los resultados obtenidos, se concluye que la producción de semillas de hidrógeno se puede obtener de lodo digerido a partir de una planta de tratamiento de aguas residuales directamente o mediante el uso de diversos lodos, seguido de métodos de pre-tratamiento de cultivo en un medio con sacarosa. La selección de un pH inicial o adición de un agente tampón puede afectar drásticamente la capacidad de la comunidad microbiana de las semillas para producir hidrógeno y por lo tanto la calidad de la semilla para uso futuro en un reactor acidogénico. La aireación y pre-tratamiento BESA, así como los lodos digeridos pretratados son eficaces en la generación de semillas que produce hidrógeno. Estos métodos especialmente, este último, son fáciles de implementar y rentables (Zhu y Béland, 2006).

A nivel general a partir de el rastreo bibliográfico realizado, se puede observar que con el re-uso de los LTAR siempre se debe buscar la eliminación de los patógenos presentes en el lodo, es por esa razón, que las aplicaciones más viables y confiables se basan en incineración, gasificación y pirolisis; debido a que en ellas se logra una eliminación total de los agentes patógenos. Cuando

son usados como acondicionadores para suelos, debe tenerse especial cuidado con el suelo sobre el cual se realiza la aplicación, además de su riqueza nutricional, con el objetivo de lograr un mayor enriquecimiento y acondicionamiento de los suelos que permite una mejoría de los mismos, pero con un tratamiento y uso adecuado.

## CONCLUSIONES

- En Colombia existe una necesidad asociada con un riesgo público, a fin de proponer una mejor disposición de los lodos de tratamiento de aguas tanto residual como potable, a la vez que un mejor aprovechamiento de estos. Se concluye que hace falta más compromiso por parte del estado para crear leyes que regulen y obliguen al tratamiento y re-uso de los LTAP y LTAR, que contribuyan con el desarrollo sostenible de la nación.
- En Colombia hay necesidad de actualizar y en algunos casos crear por ciudades una base de datos coordinada en la cantidad y calidad de los lodos de PTAP y PTAR producidos por año, así como las prácticas utilizadas para su eliminación. Claramente, este es un tema que requiere atención crítica en vista de los crecientes intentos de re-uso de LTAP Y LTAR.
- La generación de los LTAP es inevitable, su alcance se ha convertido en un elemento importante en la planificación y gestión de los recursos hídricos. Los métodos de eliminación aplicados por la mayoría de países, pueden ser suficientes por el momento, pero muestra la necesidad de un estudio y normatización más exigente si queremos un ambiente sostenible. Es por ello importante el compromiso de cada país en investigación y en inversión de nuevas tecnologías para hacer de este residuo un subproducto aprovechable y rentable. Esto mejoraría la viabilidad comercial e industrial, además de ofrecer reducciones significativas en los costos actuales y futuros de eliminación de lodos.
- Basados en la bibliometría y analizando la información existente sobre los lodos generados de las PTAP y PTAR, realizada en las bases de datos SCIENCE DIRECT y SCOPUS, se puede observar que ha surgido un mayor interés en investigación científica para solucionar el problema causado por la generación de los lodos provenientes de las PTAR, comparado con los originados por las PTAP. Se puede concluir que ha sido una evolución creciente en cuanto a avances de nuevas tecnologías investigadas,

encontradas y puestas en marcha, y que además, esta evolución creciente hace parte de un interés colectivo de países en vía de desarrollo que se vieron afectados por no estar preparados para los impactos ambientales causados por la generación de estos lodos.

- El medio ambiente se deteriora y decae cada día más a causa de intervención humana y ningún país, aun los más avanzados, están exentos de sufrir el deterioro de los ecosistemas. Razón que lleva a los diferentes países a encontrar alternativas amigables con el medio ambiente para minimizar el impacto ocasionado por el mal manejo que a través de los años se le ha dado a los lodos residuales.
- Al aplicar cada una de las tecnologías propuestas en este documento, es importante tener en cuenta la composición de los lodos, debido a que este debe cumplir con unas características específicas para su posterior aplicación. Si bien la mayoría de las opciones de re-uso son similares en su enfoque metodológico, son específicas en requerimientos y condiciones operativas. Además, se espera que con los esfuerzos de la investigación sobre el desarrollo sostenible, surjan nuevas rutas de re-uso.
- La aplicación de los lodos de PTAP en tierra es una opción ventajosa económicamente, pero se necesita de un análisis en su contenido de contaminantes para no causar en el sitio de aplicación consecuencias que agredan desfavorablemente el lugar, para ello se requiere de un control permanente y de establecer las condiciones necesarias y el lodo con las características requeridas para la aplicación correcta del mismo. De igual modo los factores más limitantes para el re-uso benéfico de los LTAP en su aplicación en tierra son su composición química en términos de contenidos de coagulante, materia orgánica, iones y niveles de metales.
- Para la industria de la construcción, los lodos muestran una gran aplicabilidad, siendo una fuente de producción constante y confiable, debido a que cumplen las características necesarias para generar una composición mínima aceptable tanto en la elaboración de cemento como la de ladrillo.

- En cuanto a la aplicación de los LTAP como sustrato para humedales artificiales en el tratamiento de aguas residuales, es una idea novedosa de gran impacto sobre este proceso. De igual forma se debe realizar una amplia investigación, evidenciando la eficiencia del tratamiento y la posible liberación de sustancias tóxicas.
- Al realizar una comparación entre los LTAP y LTAR, se puede observar la diferencia en características y composición de cada uno de ellos; los LTAP, son lodos con una alta carga de coagulante que a su vez poseen metales pesados dependiendo del cuerpo hídrico en el cual se ubique la bocatomía, además hay que tener en cuenta que el lodo generado dependiendo de la fuente cumpla con determinadas características que lo hacen apto para determinado re-uso. Los LTAR a diferencia de los LTAP, poseen una cantidad considerable de microorganismos que lo hacen apto para otro tipo de aplicaciones, pero su aplicación requiere de cuidado y caracterización previa para su uso.
- La posible transferencia de patógenos en la cadena alimentaria es una preocupación al aplicar los LTAR sobre el suelo, pero esto no supone problema en el caso de los lodos de abastecimiento de agua, ya que sus niveles de patógenos son bajos. De hecho, salvo una fuente de agua cruda muy contaminada, los lodos de abastecimiento de agua son relativamente limpios con respecto a los metales pesados y compuestos orgánicos, y no son foco de riesgo ambiental en comparación con lodos de aguas residuales. Es imprescindible tener una caracterización completa a los lodos para saber el uso adecuado que se debe dar a estos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Kamar, V.; Shang, L. Sludge: A waste or renewable source for energy and resources recovery?. *Renewable and sustainable energy. Reviews*. 2013, 25-82. 708-723.

Almeida, G.; Fanhani, C. J.; D'Oliveiras, S. P.; y Dias-Filho, P. B. Eficiência dos processos químico e térmico na higienização de lodo de esgoto. *Iniciação Científica Cesumar*. 2006, 08(1):95.

Alonso, E.; Callejón, M.; Jiménez, J.; Ternero, M. Heavy metal extractable forms in sludge from wastewater treatment plants. *Chemosphere* 2002, 47, 765–75.

Anderson, M.; Biggs, A.; Winters, C. Use of two blended water industry byproduct wastes as a composite substitute for traditional raw materials used in clay brick manufacture. In: *Proceedings of the International symposium on recycling and reuse of waste materials*, Dundee, Scotland, UK. 2003.

Andreoli, C.; Von-Sperling, M. y Fernandes, F. Principios do tratamento biológico se águas residuárias, lodos de esgotos: tratamento e disposição final. Departamento do Engenharia Sanitaria e Ambiental – DESA – UFMG, Companhia de Saneamento do Paraná – SANEPAR. Belo Horizonte, Brazil. 6, 2001.

Angenent, L. T.; Karim, K.; Al-Dahhan, M. H.; Wrenn, B. A.; Domínguez-Espinosa, R. Production of bioenergy and biochemicals from industrial and agricultural wastewater. *Trends in Biotechnology. Review. USA-MEXICO*. 2004, 22, 477-485.

Araque, M. P. Evaluación de los tratamientos térmico y alcalino en la desinfección del lodo generado en la PTAR El Salitre. *Maestría en Ingeniería Ambiental*. Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. 2006.

Avery, L. A.; Williams, P.; Killham, K.; y Jones, D. Heat and lime-treatment as effective control methods for *E. coli* O157:H7 in organic wastes. *Bioresour Technol*. 2009, 100(10): 2692 - 2698.

Babatunde, A.O.; Zhao. Y.Q. Constructive approach towards water treatment works sludge management: An international review of beneficial re-uses. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 2007, 37, 129-164.

Bagge, E.; Sahlström, L.; y Albiñ, A. The effect of hygienic treatment on the microbial flora of biowaste at biogas plants. *Water Res.* 2005, 39(20):4879 - 4886.

Basibuyuk, M.; Kalat, D.G. The use of waterworks sludge for the treatment of Vegetable Oil refinery Industry wastewater. *J. Environ. Techno.* 2004, 25, 373-380.

Basta, N.T. Examples and case studies of beneficial reuse of municipal by-products. In J.F. Power and W.A. Dick (eds.) *Land application of agricultural, industrial, and municipal by-products.* Book Series No. 6, Soil Science Society of America, Madison, WI. 2000.

Beecher, N.; Crawford, K.; Goldstein, N.; Kester, G.; Lono, M.; Dziezyk, E. *A National Biosolids Regulation, Quality, End Use & Disposal Survey.* North East Biosolids and Residuals Association (NEBRA). Tamworth, NH. 2007.

*Biosolids Generation, Use and Disposal in the United States; Municipal and industrial solid Waste Division Office of Solid Wasted.* US. Environmental Protection Agency. Washington. Septiembre, 1999, 57p.

Biosolids Management Program (formerly called EMS Program). <http://www.wef.org/Biosolids/page.aspx?id=7554> (Consultado: Abril 12, 2014).

Campbell H. Sludge management—future issues and trends. *Water Science and technology.* 2000, 41(8):1–8.

Cardenas, C.; Masmela S. Estudio de la tratabilidad de residuos Sólidos específicos por medios anaeróbicos “Lodos”. Tesis. Universidad Industrial de Santander. Colombia, 1988.

Carvalho, M.; Antas, A. Drinking water sludge as a resource. In: *Proceedings of IWA specialised conference on management of residues emanating from water and wastewater treatment, Johannesburg, South Africa.* 2005.

Castillo, E. F.; Vergara, M.; Cristancho, D. E.; Arenas, L. P.; Martínez, A.; Hernández, M. A.; Luna, H. J.; Castillo, J.; sandoval, C. J. *Digestión Anaerobia una alternativa para el tratamiento de residuos sólidos urbanos.* Centro de Estudios E Investigaciones Ambientales. Universidad Industrial de Santander. 2007.

Castrejón, A.; Barrios, J. A.; Jiménez, B.; Maya, C.; Rodríguez, A. C.; y González, A. Evaluación de la calidad de lodos residuales de México. Instituto de Ingeniería. Grupo de Tratamiento y Reúso. Universidad Nacional Autónoma de México, México. 2000, 14 p.

Cenni, R.; Janisch, B.; Spliethoff, H.; Hein, K. Legislative and environmental issues on the use of ash from coal and municipal sewage sludge co-firing as construction material. *Waste Manage.* 2001, 21, 17–31.

Chang J. S.; Lee K. S.; Lin P. J. Biohydrogen production with fixed-bed bioreactors. *Int J Hydrogen Energy.* 2002, 27, 1167–74.

Chen, G.H. Introduction of HK University of Science & Technology. *Environ. Sani. Eng. Res. Kyoto University.* 1996, 10, 43–46.

Chih-Huang, W.; Deng-Fong, L., Pen-Chi, C. Utilization of sludge as brick materials. Elsevier. *Advances in Environmental Research 7.* Taiwan. 2003, 679-685.

Chu, C.; Lee, D.; Chang, C. Thermal pyrolysis characteristics of polymer flocculated waste activated sludge. *Water Res.* 2001, 35, 49–56.

Chu, W. Dye removal from textile dye wastewater using recycled alum sludge. *Water Res.* 2001, 35 (13), 3147–3152.

Chu, W. Lead metal removal by recycled alum sludge. *Water Res.* 1999, 33 (13), 3019–3025.

Colín, A. Obtención de un carbón activado proveniente de la pirolisis de lodos residuales y su evaluación como material de sorción. Tesis de Doctorado. Universidad Autónoma del Estado de México. Facultad de Ingeniería. Toluca. Estado de México. Junio, 2007

Colín, F.; Leschber, R. y Mininni, G. Physical and chemical characterization of sewage sludge. En *Sewage sludge treatment and use: New developments, technological aspects and environmental effects.* Ed. A. H. Dirkzwager and P. L'Hermite. Elsevier Applied Science. London, 1989, pp.40-51.

Commission of European Communities. Council Directive 99/31/EC of 26 April 1999 on the landfill of waste.

Comparini, J. B.; Sobrinho, P. A. Decaimento de patógenos em biossólidos submetidos à secagem em estufa agrícola. *Federación Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales. AIDIS. Gestión inteligente de los recursos naturales: desarrollo y salud. FEMISCA.* México, DF. 2002, 8p.

Culp, R.L.; Wilson, W.I. Is alum sludge advantageous in wastewater treatment? *Water Wastes Eng.* 1979, 16, 16–19.

Das, D.; Veziroglu, TN. Hydrogen production by biological processes: a survey of literature. *Int J Hydrogen Energy*. 2001, 26, 13–28.

Dayton, E.A.; and Basta, N.T. Characterization of drinking water treatment residuals for use as a soil substitute. *Water Environ. Res.* 2001, 73(1), 52-57.

De-Bashan, L. E.; Bashan, Y. Recent advances in removing phosphorus from wastewater and its future use as fertilizer (1997–2003). *Wat.Res.* 2004, 38, 4222-4246.

Decreto 4741. República de Colombia. Ministerio de Ambiente. Noviembre 30, 2005.

Dennis, J. S.; Lambert, R. J.; Milne, A. J., Scott, S.A.; Hahurst, A. N. The kinetics of combustion of chars derived from sewage sludge. *Fuel*. 2005, 84, 117–26.

Dhage, S.S.; Paramasivam, R.; Ravindar, R.; Andey, S.P. Recovery of alum from water treatment sludge by liquid ion exchange (LIE) technique. *J. Indian Wat. Works Assoc.* 1985, 17, 193-199.

Dogru, M.; Midilli, A.; Howarth, C. R. Gasification of sewage sludge using a throated downdraft gasifier and uncertainty analysis. *Fuel Process Technol.* 2002, 75, 55–82.

RCN La radio. El 70% de aguas residuales de Colombia no se trata y se usa para cultivos, Noviembre 27, 2012. <http://www.rcnradio.com/noticias/el-70-de-aguas-residuales-de-colombia-no-se-trata-y-se-usa-para-cultivos-35263>. (Consultado: Febrero 12, 2014).

El-Didamony, H.; Khalil, K. A.; Heikal, M. Physico-chemical and surface characteristics of some granulated slag-fired drinking water sludge composite cement pastes. Chemistry Department. Faculty of Science. Al Iman Mohammed Ibn Saud Islamic University (IMSIU). 2014, 10, 73-81.

Elizabeth, A.D.; Nicholas, T.B.; Christopher, A.J.; Jeffory, A.H. Using treatment residuals to reduce phosphorus in agricultural runoff. *J. Am. Wat. Works Assoc.* 2003, 95, 151- 158.

Elliot, H.A.; O`Connor, G.A.; Lu, P.; Brinton, S. Influence of water treatment residuals on phosphorus solubility and leaching. *J. Environ Qual.* 2002. 31, 1362-1369.

Elliott, H.A.; Dempsey, B.A. Agronomic effects of land application of water treatment sludge. *J.Am.Wat.Works Assoc.* 1991, 83, 126-131.

Environmental Protection Agency. Control of pathogens and vector attraction in sewage sludge under 40 CFR part 503. Office of Water/Office Science and Technology Sludge/Risk Assessment Branch. Washington. 2003, 173 p.

Environmentally Sound Technologies in wastewater treatment for the implementation of the UNEP GLOBAL PROGRAMME OF ACTION (GPA) "GUIDANCE ON MUNICIPAL WASTEWATER". United Nations Environment Programme.

[http://www.unep.or.jp/ietc/publications/freshwater/sb\\_summary/index.asp](http://www.unep.or.jp/ietc/publications/freshwater/sb_summary/index.asp).

(Consultado: Julio 4 de 2014).

Eshtiaghi, N.; Markis, F.; Yap, S.D.; Baudez, J. C.; Slatter, P. Rheological characterisation of municipal sludge: A review. *Water research. Review. Australia*. 2013, 47, 5493-5510.

European Commission. DG Environment-B/2, Disposal land recycling routes for sewage sludge. Synthesis report. 2002.

Evanylo, G., B.; Sukkariyah, M.; Anderson E.; y Zelazny, L. Bioavailability of heavy metals in biosolids-amended soil. *Com. Soil Sci. Plant Analysis*. 2006, 37, 2157 - 2170.

Fenghai, W.; Dennis, C.; Jean-Christian, A; Peter, G.C.C. Effects of alum treated wastewater sludge on barley growth. *J. Water, air and soil pollution*. 1998, 108, 33-49.

Fernandes, F.; De Souza, S. Estabilização de lodo de esgoto, en: *Resíduos sólidos do saneamento; Processamento, reciclagem e disposição final*. ABES y PROSAB. Brasil. 2001, Cap. 2:282.

Ferraris, G.; Couretot, L.; Toribio M. Perdidas de nitrógeno por volatilización e implicaciones en el rendimiento de maíz. *Inform. Agron*. 2009, 1, 1 - 13.

Forstner, V.; Haase, I. Geochemical demobilization of metallic pollutants in solid wastes-implications for arsenic in waterworks sludge. *J. Geochemical exploration*. 1998, 62(1-3), 29-36.

Franco, O.; McKelligan, A. N.; López, A. M.; Espinosa, E; Escamilla, E.; y Dendooven, L. Dynamics of carbon, nitrogen and phosphorus in soil amended with irradiated, pasteurized and limed biosolids. *Biores. Technol*. 2003, 87(1):93 - 102.

Fuentes, A.; Llorens M, Saez J, Soler A, Aguilar M, Ortuno F, et al. Phytotoxicity and heavy metals speciation of stabilised sewage sludges. *J Hazard Mater* 2004, 108, 161–9.

Fytili, D.; Zabaniotou, A. Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods- A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Review. Greece. 2008, 12, 116-140.

Gallimore, L.E; Basta, N.T; Storm, D.E; Payton, M.E.; Huhnke, R.H.; Smolen M.D. Water treatment residual to reduce nutrients in surface runoff from agricultural land. *J. Environ Qual*. 1999, 28, 1474-1478.

Gantzer, C. Monitoring of bacterial and parasitological contamination during various treatment of sludge. *Water Res*. 2001, 35(16):3763 - 3770.

Georgantas, D.A.; Grigoropoulou, H.P. Phosphate removal from synthetic and municipal wastewater using spent Alum sludge. *Wat. Sci. & Tech*. 2005, 52(10- 11), 525-532.

George, D. B.; Berk, S. G.; Adams, V. D.; Ting, R. S.; Roberts, R. O.; Parks, L. H.; Lott, R. C. Toxicity of alum sludge extracts to a freshwater alga, protozoan, fish, and marine bacterium. *Arch. Environ. Contam. Toxicol*. 1995,29(2), 149-158.

Goldbold, P.; Lewin, K.; Graham, A.; Barker, P. The potential reuse of water utility products as secondary commercial materials. In: WRC technical report series. No UC 6081, project contract no. 12420-0. 2003.

Guan, X.H.; Chen, G.H.; Shang, C. Re-use of water treatment works sludge to enhance particulate pollutant removal from sewage, *Water Res*. 2005, 39, 3433–3440.

Hall, J. E.; Sewage sludge production, treatment and disposal in the European Union. *J CIWEM* 1995, 9, 335–42.

Hein, K. R. G.; Bemtgen, J. M. EU clean technology-co-combustion of coal and biomass. *Fuel Process Technol* 1998; 54:159–69.

Hoitink, H. A.; Moore, T. L.; Horst, L. E.; Krause, C. R.; Zondag, R. A.; Mathers, H. Biological suppression of foliar diseases of ornamental plants with composted manures, biosolids, and *Trichoderma hamatum*. En: Ohio Agricultural Research and Development Center, Wooste. *Ornamental Plants Special Circ*. 2003, 189:50 - 56.

Horth, H.; Gendebien, A.; Agg, R.; Cartwright, N. Treatment and disposal of waterworks sludge in selected European countries. In: Foundation for water research technical reports No.FR 0428. 1994.

Huang, S.H.; Chiswell, B. Phosphate removal from wastewater using spent Alum sludge. *Wat. Sci. & Tech.* 2000, 2, 295-300.

Hyde, J.E.; Morris, T.F. Phosphorus availability from phosphorus-amended water treatment residual. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 2004, 35, 1033-1046.

IWA. *Constructed Wetlands for Pollution Control: Processes, Performance, Design and Operation.* London: IWA Publishing. 2000.

Kääntee, U.; Zevenhoven, R.; Backman, R.; Hupa, M. Cement manufacturing using alternative fuels and the advantages of process modelling. *Fuel Process Technol.* 2004, 85, 293–301.

Kely, G. *Ingeniería ambiental; fundamentos, entornos, tecnologías y sistemas de gestión.* McGraw Hill. España, 1999.

Khiari, B.; Marias.; Zagrouba, F.; Vaxelaire, J. Analytical study of the pyrolysis process in a wastewater treatment pilot station. *Desalination.* 2004, 167, 39–47.

Kiely, G. *Ingeniería ambiental. Fundamentos, tecnologías y sistemas de gestión.* Vol I, II y III. España. Mac Graw Hill. 1999.

Kikuchi, R. Recycling of municipal solid waste for cement production: Pilot-scale test for transforming incineration ash of solid waste into cement clincker. *J. Resources, Conservation and Recycling.* 2001, 31, 137-147.

Kim, J.G.; Kim, J.H.; Moon H.; Chon C.; Ahn, J.S. Removal capacity of water plant alum sludge for phosphorus in aqueous solution. *Chemical Speciation and Bioavailability.* 2003, 14, 67-73.

Klemeš, J.J.; Stehlík, P.; Worrell, E. Waste treatment to improve recycling and minimise environmental impact, *Resour. Conserv. Recycl.* 2010, 54, 267–270.

Kroiss, H., Zessner, M. Wastewater treatment and sludge disposal - what are the challenges?. 2010. <http://netedu.xauat.edu.cn/jpkc/netedu/jpkc2009/szylyybh/content/wlzy/7/6/3%20Kroiss.pdf> (Consultado: Noviembre 13, 2013).

Lai, J.Y.; Liu, J.C. Co-conditioning and dewatering of alum sludge and waste activated sludge. *Wat. Sci. & Tech.* 2004, 50, 41-48.

Lang, L.; Stephen, R. Time and temperature inactivation kinetics of enteric bacteria relevant to sewage sludge treatment processes for agricultural use. *Water Res.* 2008, 42(8-9):229 - 2241.

Laternus, F.; Arnolg, K.; Gron, C. Organic Contaminants from Sewage Sludge applied to agricultural Soils False Alarm Regarding Possible Problems for Food Safety?. *Sustainable Agriculture, Health Issues.* 2007, 1, 53-60.

Li, P. and Sengupta, A.K. (1995). Selective recovery of alum from clarifier sludge using composite ion exchange membranes. In: *Proc.of 27th mid Atlantic Ind.Waste Conf.*, Bethlehem, PA (Technomic).

Lin, Y.F., Jing, S.R., and Lee, D.Y. Recycling of wood chips and wheat dregs for sludge processing. *Bioresource Tech.* 2001, 76, 161-163.

Liu, Y., Tayj, H. Strategy for minimization of excess sludge production from the activated sludge process. *Biotechnology Advances.* 2001, 19 (2): 97–107.

Lopera, M. J.; Campos, S. M.; Olarte, B.C. Proyecto: Desarrollo De Capacidades Para El Uso Seguro De Aguas Servidas En Agricultura. República De Colombia. Santa fé de Bogotá. Noviembre, 2012.  
[http://www.ais.unwater.org/ais/pluginfile.php/378/mod\\_page/content/144/COLOMBIA.pdf](http://www.ais.unwater.org/ais/pluginfile.php/378/mod_page/content/144/COLOMBIA.pdf) (Consultado: Mayo 24, 2014).

Lopes, M. A. Incorporação de lodo de esgoto e seus efeitos sobre alguns atributos do solo cultivado com rabanete. *Posgraduação em Desemvolvimento em processis ambientais.* Universidad Católica de Pernambuco. 2008.

Lundin, M.; Olofsson, M.; Pettersson, G.; Zetterlund H. Environmental and economic assessment of sewage sludge handling options. *Resource Conservat Recycle.* 2004, 41, 255–78.

Masschelein, W.J.; Devleminck, R.; Genot, J. The feasibility of coagulant recycling by alkaline reaction of aluminium hydroxide sludge. *Wat.Res.* 1985, 19, 1363-1368.

Mathieu, P.; Dubuisson, R. Performance analysis of biomass gasifier. *Energy Conserv Manage.* 2002, 43, 1291–9.

Medidas de protección sanitaria en el aprovechamiento de aguas residuales. OMS, 1989.

Menendez, J. A.; Inguanzo, M.; Pis, J.J. Microwave-induced pyrolysis of sewage sludge. *Water Res.* 2002, 36, 3261–4.

Metcalf, Eddy. *Wastewater engineering: treatment and reuse*; McGraw-Hill; 4<sup>a</sup> Ed. Inc. U. S. A., 2003; Vol: 5, pp. 1138-1162.

Mo, W.; Zhang, Q. Energy-nutrients-water nexus: Integrated resource recovery in municipal wastewater treatment plants. *Journal of environmental Management. Review.* 2013, 123.

Moghaddama, S.S.; Alavi Moghaddam, M.R.; Arami, M. Coagulation/flocculation process for dye removal using sludge from water treatment plant: optimization through response surface methodology, *J. Hazard. Mater.* 2010, 175, 651–657.

Montgomery, J.M. *Water Treatment Principles and Design*. Wiley, New York. 1985.

Monzó, J.; Paya, J.; Borrachero, M. V.; Girbes, I. Reuse of sewage sludge ashes (SSA) in cement mortars. *Waste Manage.* 2003, 23, 373–81.

Moodley, M.; Hughes, J.C. The effects of a polyacrylamide-derived water treatment residue on the hydraulic conductivity, water retention and evaporation of four contrasting South African soils and implications for land disposal. In: *Proceedings of IWA specialised conference on management of residues emanating from water and wastewater treatment*, Johannesburg, South Africa. 2005.

Morishita, T.; Nakata, H.; Sakai, M. Experimental studies on product gas composition from biomass by steam cracking. In: *Proceedings of the 10th meeting of Japan Institute of Energy*, Kitakyushu. 2001, p. 337–40.

North East Biosolids and Residuals Association (NEBRA). *A National Biosolids Regulation, Quality, End Use & Disposal Survey*, Tamworth, NH. 2007.

Norma OS.090 PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.

Novak, J.M.; Watts, D.W. Increasing the phosphorus sorption capacity of southeastern coastal plain soils using water treatment residuals. *Soil Sci.* 2004, 169, 206-214.

Noyola, R. A.; Vega, G. E.; Ramos, H. J. G. y Calderón, M. C. G. Alternativas de tratamiento de aguas residuales. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). 3a Ed. México, 2000.

Owen, P.G.; Water-treatment work's sludge management. J. CIWEM. 2002, 16, 282-285.

Pan, J.R.; Huang, C.; Lin, S. Reuse of fresh water sludge in cement making. Wat. Sci. & Tech. 2004, 50, 183-188.

Paul, E.P.; Linstedt, K.D.; Bennett, E.R. Recovery and reuse of Iron coagulants in water treatment. J.Am. Wat. Works Assoc. 1978, 70, 397-403.

Pecku, S.; Hunter, C.H.; Hughes, J.C. The effects of water treatment residues on soil respiration and microbial community structure. In: Proceedings of IWA specialised conference on management of residues emanating from water and wastewater treatment, Johannesburg, South Africa. 2005.

Pecson, B. M.; Barrios, J. A.; Jiménez, J. A. y Nelson, K. L. The effects of temperature, pH, and ammonia concentration on the inactivation of ascaris eggs in sewage sludge. Water Res. 2007, 41(13):2893 - 2902.

Peters, J.M; Basta, N.T. (1996). Reduction of excessive bioavailable phosphorus in soils by using municipal and industrial wastes. J. Environ. Qual. 25(6), 1236-1241.

Petruzelli, D.; Limoni, N.; Tiravanti, G; Passino, R. Aluminium recovery from water clarifier sludges by ion exchange. Comparison of weak and strong electrolyte cation resin performances. J. Reactive and functional Polymers. 1998, 38, 227-236.

Petruzelli, D.; Volpe, A.; Limoni, N.; Passino, R. Coagulants removal and recovery from water clarifier sludge. Wat. Res. 2000, 34, 2177-2182.

Presidencia de la Republica. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Abastecimiento de Agua y Alcantarillado en Comunidades Rurales en Colombia. San José de Costa Rica. Febrero de 2006. [http://www.siagua.org/sites/default/files/documentos/conferencia-directores/directores\\_02\\_06/presentaciones/presentacion12.pdf](http://www.siagua.org/sites/default/files/documentos/conferencia-directores/directores_02_06/presentaciones/presentacion12.pdf) (Consultado: Mayo 24, 2014).

Qasim, S.R.; Motley, E.M.; Zhu, G. Water Works Engineering: Planning, Design, and Operation, Chiang. Patel & Yerby Inc, Prentice-Hall PTR. 2000.

Raghu, D.; Hsieh, H.; Neilan, T.; Yih, C. Water treatment plant sludge as landfill liner. In: Proceedings of speciality conference on Geotechnical practice for waste disposal, USA. 1987.

Ramalho, R. S. Tratamiento de aguas residuales. Ed. Reverté, S.A. México, 1996.

Razali, M.; Zhao, Y.Q.; Bruen, M. Effectiveness of a drinking-water treatment sludge in removing different phosphorus species from aqueous solution. Separation and Purification Technology. Ireland. 2007, 55, 300-306.

Reglamento técnico para el sector de agua potable y saneamiento básico. República de Colombia. Ministerio de Desarrollo Económico. Resolución N° 1096. RAS-2000. Noviembre 17, 2000.

Rensburg, L.; Morgenthal, T. Evaluation of water treatment sludge for ameliorating acid mine waste. J. Environ.Qual. 2003, 32, 1658-1668.

República de Colombia. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico: TÍTULO I. Componente ambiental de los sistemas de acueducto, alcantarillado y aseo/ Prada, Alvaro; Vargas, Armando; Rincón, José Miguel; Ávila, Juan Daniel; Cruz, María Elena; Sandoval, Zayda (Ed.). Bogotá, D.C. Colombia, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. 2010. 133 p. ISBN: 978-958-8491-43-1. Pág. 94.

Robert, J.G.; Edward, C.K. Silvicultural application of alum sludge. J. Am. Wat. Works Assoc. 1987, 79, 84-88.

Ronald, D.W.; Donald, I. A. Incorporation of a water softening sludge into pozzolanic paving material. J. Am. Wat. Works Assoc. 1977, 69, 175-185.

Salotto, B.V.; Farrell, J.B.; Dean, R.B. The effect of water-utility sludge on the activated-sludge process. J. Am. Water Works Assoc. 1973, 65, 428-431.

SCIENCE DIRECT. <http://www.sciencedirect.com/> (Consultado: Julio 4, 2014).

SCOPUS. <http://www.scopus.com/> (Consultado: Julio 4, 2014).

Shen, L.; Zhang, D-K. An experimental study of oil recovery from sewage sludge by low-temperature pyrolysis in a fluidised-bed. Fuel. 2002, 82, 465-72.

Shinogi, Y.; Kanri, Y. Pyrolysis of plant, animal and human waste: physical and chemical characterisation of pyrolytic products. Biores Technol. 2003, 90, 241-7.

Sidhu, J.; Toze, S. G. Human pathogens and their indicators in biosolids: A literature review. *Environ. Int.* 2009, 35:187 - 201.

Smith, K. M.; Fouler, G. D.; Pullket, S.; Graham, N.J.D. Sewage sludge-based adsorbents: A review of their production, properties and use in water treatment applications. *Review. Water research.* London. 2009, 43, 2569-2594.

Smith, S.R. *Agricultural Recycling of Sewage Sludge and the Environment.* London: CAB International, 1996.

Sogaard, H. T.; Sommer, S. G.; Hutchings, N. J.; Huijsmans, J. F.; Bussink, D. W.; Nicholson, F. Ammonia volatilization from field-applied animal slurry. The ALFAM model. *Atmospheric Environ.* 2002, 20 (7):3309 - 3319.

Sotero-Santos, R. B.; Rocha, O.; Povinelli, J. Evaluation of water treatment sludge toxicity using the *Daphnia* bioassay, *Wat. Res.* 2005, 39(16), 3909-3917.

Stendahl, K.; Färm, C.; Fritzdorf, I.; Ulmert, H. The REAL process – a process for recycling of sludge from water works. In: *Proceedings of IWA specialised conference on management of residues emanating from water and wastewater treatment, Johannesburg, South Africa.* 2005.

Sujana, M.G.; Thakur, R.S.; Rao, S.B. Removal of fluoride from aqueous solution using alum sludge. *J colloid and interface science.* 1998, 206, 94-101 no. CS985611.

Sun, L.H. Lv, M.; Yang, Y.L.; Zhou, L.L.; Li, G.B. Enhanced treatment of water with low turbidity: combined effects of permanganate, PAM and recycled sludge, *J. Harb. Inst. Technol.* 2009, 16, 863–868.

Sung, S.; Raskin, L.; Duangmanee, T.; Padmasiri, S.; Simmons, J.J. Hydrogen production by anaerobic microbial communities exposed to repeated heat treatments. *Proceeding of the 2002 US DOE hydrogen program review.* <http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/32405a13.pdf>. (Consultado: Julio 20, 2014).

Titshall, L.W.; Hughes, J.C. Characterization of some South African Water treatment residues and implications for land application. *J. Water SA.* 2005, 31, 299-307.

Vaezi, F.; Batebi, F. Recovery of Iron coagulants from Tehran Water-Treatment-Plant Sludge for reusing in Textile wastewater treatment. *Iranian Journal of Public Health.* 2001, 30, 135-138.

Valls S, Vazquez E. Accelerated carbonation of sewage sludge–cement–sand mortars and its environmental impact. *Cement Concrete Res* 2001, 31, 1271–6.

Valls, S.; Vazquez, E. Stabilisation and solidification of sewage sludges with Portland cement. *Cement Concrete Res.* 2000, 31, 1671–8.

Viceministerio de Medio Ambiente. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico. Marzo, 2010. [http://www.minambiente.gov.co/documentos/5774\\_240610\\_libro\\_pol\\_nal\\_rec\\_hidrico.pdf](http://www.minambiente.gov.co/documentos/5774_240610_libro_pol_nal_rec_hidrico.pdf) (Consultado: Junio 31, 2014).

Vicenzi, J.; Moura, A.; Bergmann. C. Evaluation of alum sludge as raw material for ceramic products. *J. Industrial Ceramics.* 2005, 25, 7-16.

Wang, C. C.; Chang, C. W.; Chu, C. P.; Lee, D. J.; Chang, B. V.; Liao, C. S., Tay, J. H. Using filtrate of waste biosolids to effectively produce bio-hydrogen by anaerobic fermentation. *Water Res.* 2003, 37, 2789–93.

Water Environment Federation (WEF). The water quality people. <http://www.wef.org/Biosolids/page.aspx?id=7554> (Consultado: Mayo 5, 2014).

Werther, J.; Ogada, T. Sewage sludge combustion. *Progress Energy Combust Sci.* 1999, 25, 55–116.

Wu, C.; Lin, C.; Chen, R. Regeneration and reuse of water treatment plant sludge: Adsorbent for cations. *J. Environ. Sci. & Health A.* 2004b, 39, 717-728.

Wu, Chung-Hsin; Lin, Cheng-Fang; Horng, Pay-Yu. Adsorption of copper and lead ions onto regenerated sludge from a water treatment plant. *J. Environ. Sci & Health. A.* 2004a, 39, 237-252.

Yang, Y.; Tomlinson, D.; Kennedy, S.; Zhao, Y.Q. Dewatered alum sludge: A potential adsorbent for phosphorus removal. *Wat. Sci. & Tech.* 2006a.

Yang, Y.; Zhao, Y. Q.; Babatunde, A. O.; Wang, L.; Ren, Y. X.; Han, Y. Characteristics and mechanisms of phosphate adsorption on dewatered alum sludge. *Separation and Purification Technology.* 2006b.

Zhao, Y.Q.; Razali, M.; Babatunde, A.O.; Yang, Y.; Bruen, M. Reuse of aluminumbased water treatment sludge to immobilize a wide range of

phosphorus contamination: equilibrium study with different isotherm models, *Sep. Sci. Technol.* 2007, 42, 2705–2721.

Zhou, Z.; Yang, Y.; Li, X.; Wang, W.; Wu, Y.; Luo, J. Coagulation performance and flocs characteristics of recycling pre-sonicated condensate sludge for low-turbidity surface water treatment. Elsevier. *Separation and Purification Technology*. China. 2013, 123, 1-8.

Zhou, Z.W.; Yang, Y.L.; Li, X.; Gao, W.; Liang, H.; Li, G.B. Coagulation efficiency and flocs characteristics of recycling sludge during the treatment of low temperature and micro-polluted water, *J. Environ. Sci.* 2012, 24, 1014–1020.

Zhu, H.; Béland, M. Evaluation of alternative methods of preparing hydrogen producing seeds from digested wastewater sludge. *International journal of hydrogen energy*. Canada. 2006, 31, 1980-1988.

Zumpe, H.; Baskaran, K. Reuse of water treatment plant sludge for phosphorus removal. In: *Proceedings of 3rd World Water Congress*. Melbourne, Australia, Paper Ref. No. e20260a. 2002.