



FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES
CARRERA PROFESIONAL DE
INGENIERÍA AMBIENTAL

“APROVECHAMIENTO DE LODOS ACTIVADOS PROVENIENTES
DE PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PARA
LA OBTENCIÓN DE CARBÓN
ACTIVADO”

Trabajo de investigación para optar el Grado de Bachiller
en: INGENIERÍA AMBIENTAL

Presentado por:

Mercedes Huamán Siuce (0000-0003-0990-3831)

Asesor:

Elvito Fabián Villegas Silva (0000-0001-9783-1641)

Lima – Perú
2020



RESOLUCIÓN DIRECTORAL ACADÉMICA DE CARRERA N° 242-2020-DACIA-DAFCA-CIENTIFICA

FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES / CARRERA DE INGENIERIA AMBIENTAL

Lima 16 de noviembre de 2020

VISTO:

La revisión realizada y la aprobación de Trabajo de Investigación titulado:
“APROVECHAMIENTO DE LODOS ACTIVADOS PROVENIENTES DE PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PARA LA OBTENCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO”, presentado por:

- **Mercedes Huamán Siuce**

CONSIDERANDO:

Que, de acuerdo al Reglamento General de la Universidad Científica del Sur y los reglamentos de pregrado para obtener el grado de Bachiller de **Ingeniería Ambiental** en la **Facultad de Ciencias Ambientales**, se debe desarrollar un trabajo de investigación.

Que, de acuerdo a la normativa vigente de la Universidad Científica del Sur, en uso de las atribuciones conferidas al Director Académico de Carrera.

SE RESUELVE:

Aprobar e inscribir el trabajo de investigación titulado: **“APROVECHAMIENTO DE LODOS ACTIVADOS PROVENIENTES DE PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PARA LA OBTENCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO”** con N° de registro de la carrera: **093-FCA-IAM**.

Nombrar al docente/colaborador **Elvito Fabián Villegas Silva** como asesor de dicho trabajo de investigación.

Regístrese, comuníquese y archívese,



Mg. Gonzalo Francisco Flores Roca
Director Académico de Carrera
Ingeniería Ambiental

APROVECHAMIENTO DE LODOS ACTIVADOS PROVENIENTES DE PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PARA LA OBTENCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO

Mercedes Huaman Siuce 1 y Elvito Fabián Villegas Silva

1 facultad de Ciencias Ambientales, Universidad Científica del Sur, Lima, Perú.

*Autor de correspondencia :mercedesh.ucs@gmail.com

RESUMEN

A nivel mundial los grandes volúmenes de efluentes provenientes del áreas urbanas y sector industrial no son tratados o no reciben un tratamiento adecuado los cuales representan riesgo de salud pública y ambiental, a nivel nacional el Perú cuenta con 143 plantas las cuales solo captan 29.01% y de estas solo el 14% realizan un adecuado tratamiento. Sin embargo, a pesar que se dé un tratamiento a estas aguas para mitigar impactos, este genera también los lodos (residuo principal de PTAR) el cual representa riesgo ambiental, es por ello, la necesidad de proporcionarle un buen manejo entre ellos puede ser compostaje, incineración, mejoramiento del suelo, etc. Actualmente está llamando la atención la obtención de carbón activado a partir de estos lodos ya que son eficientes para la absorción en moléculas en medios líquidos y gaseosos, además que su obtención es de bajo costo y tiempo. En Perú no existe normativas ni protocolos para este tipo de aprovechamiento a esto se suma los escasos estudios realizados en nuestro país.

Palabras clave:

Carbón activado, lodos de PTAR, Adsorción, Activador, Tratamiento

ABSTRACT

At a global level, large volumes of effluents from urban areas and the industrial sector are not treated or receive adequate treatment, which represent a public and environmental health risk. At the national level, Peru has 143 plants which only capture 29.01% and of these only 14% perform an adequate treatment. However, although these waters are treated to mitigate impacts, they also generate sludge (the main residue of WWTP), which represents environmental risk, which is why the need to provide good management among them can be composting, incineration, soil improvement, etc. At the moment the obtaining of activated charcoal from these sludges is calling attention since they are efficient for the absorption in molecules in liquid and gaseous media, in addition that its obtaining is of low cost and time. In Peru, there are no regulations or protocols for this type of use, in addition to the few studies conducted in our country.

Keywords:

Activated carbon, PTAR sludge, Adsorption, Activator, Treatment

REVISIÓN TEÓRICA

1. Aguas residuales

1.1 Situación Global de las Aguas Residuales

El agua es el recurso más importante para la humanidad ya que este se encarga de la seguridad alimentaria, el desarrollo de los pueblos, ciudades, la seguridad energética y el desarrollo industrial (Ministerio de Agricultura y Riego, 2014); sin embargo, este recurso actualmente está sufriendo una sobre explotación y contaminación por parte del crecimiento urbano, la agricultura y sector industrial convirtiéndose así estos en competidores por el agua, aunque el sector industrial usa solo el 20% del agua extraída este es el mayor contaminante de los recursos hídricos; ya que se sabe que este sector vierte efluentes hasta en 500 millones de toneladas a nivel mundial los cuales contienen disolventes, residuos sólidos, metales entre otros residuos, estos compuestos provocan que el agua no sea potabilizada otra vez o sea de elevados costos sus tratamiento, es más ya estos se vuelven peligrosos para ecosistemas acuáticos o llegan a ser biomagnificados, porque estas aguas serán usadas en la agricultura, captación directa o un animal la esta consumiendo (UNESCO, 2017). Adicionalmente a estos conflictos el problema actual del cambio climático está provocando sequías, inundaciones y cambios estacionales es decir los patrones del ciclo del agua se están viendo afectados significativamente y por ello, también la disponibilidad del agua, producción de alimentos y de energía (Ministerio de Agricultura y Riego, 2014).

Las aguas residuales son combinaciones de diferentes tipos de efluentes estas pueden ser de índole urbano, industrial, comercial y sectores públicos; las aguas negras son residuos humanos (orina y excretas), las aguas grises producto de las actividades domésticas (producto de lavado y baño), a esto también se le suma las escorrentías agrícolas, hortícola, acuícola y urbanas (Raschid & Jayakody, 2008). Los efluentes provenientes del sector industrial y

agricultura a nivel mundial son más de 2 millones de toneladas las cuales tiene como receptor los cuerpos de agua, asimismo el 80% de estas no reciben ningún tipo de tratamiento siendo esto más común en los países que están en vías de desarrollo o latinoamericanos; provocando así que más de 2,2 millones de personas mueran por contraer enfermedades diarreicas, teniendo como población más sensible a niños menores 5 años (ONU, 2015). América Latina se caracteriza por poseer el tercio de las fuentes de agua a nivel mundial, sin embargo, la distribución de sus poblaciones provoca que exista mayor concentración en algunos lugares que en otros, es decir se convierten en enormes fuentes de contaminación, del total de generación de aguas residuales solo el 70% no recibe ningún tipo de tratamiento convirtiéndose, así como fuentes adversas a la ecología, estas cifras dan a entender que en estos países el agua es tomada, usada y devuelta contaminando así los ríos (Yee-Batista, 2013).

1.2 Situación Actual en Perú

La demanda de uso de agua en Perú el sector agrícola es el que tiene mayor porcentaje con 87.27%, poblacional 8.62%, minero 1.49%, piscícola 1.90% y industrial 0.72% (ANA, 2009). Por consecuencia el sector industrial genera descargas de efluentes que llegan a diferentes tipos de cuerpos de agua las cuales se mostraran en la figura N°1.

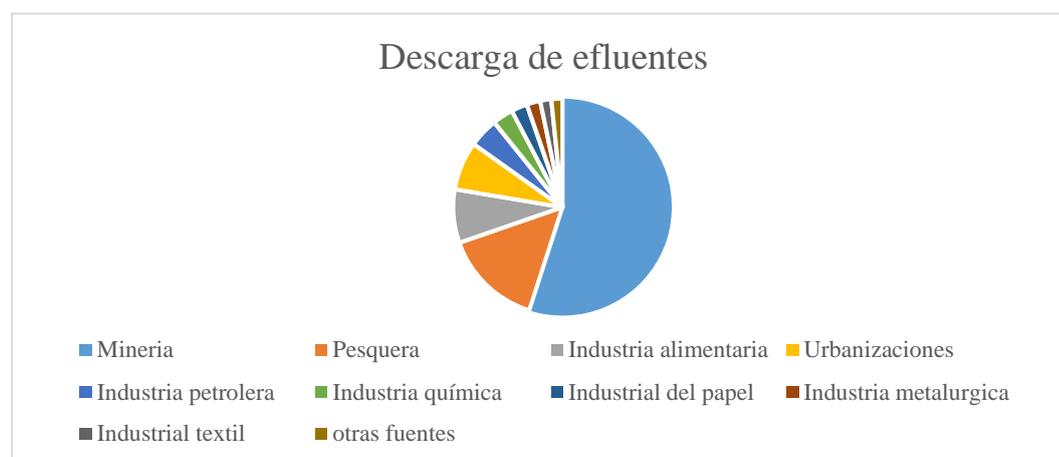


Figura 1. Vertimientos en los diferentes sectores del Perú. Fuente. ANA 2009

Los diferentes vertimientos realizados por los sectores industriales son de gran riesgo para recurso hídrico, salud pública y ambiental; ya que estos presentan toxicidad y gran carga de contaminantes convirtiéndose así en más peligrosos que los efluentes domésticos porque estas están libres de sustancias peligrosas, pero es de preocupación porque pueden contener medicamentos de uso común (UNESCO, 2017).

Las plantas de tratamiento existentes solo captan el 29.01% de aguas residuales domésticas por lo que el resto llega a lagos, ríos y mar; es decir que 530 millones de m³ llegaron directamente a impactar los cuerpos las cuales son usadas en las actividades económicas a esto se le suma los vertidos de la actividades mineras e industriales que tienen efectos significativos en la calidad de agua, suelo y aire que poniendo en riesgo la salud pública (Méndez & Marchán, 2007). En nuestro país solo existe 143 establecimientos para tratar aguas residuales (PTAR), de los cuales solo el 14% hace un adecuado tratamiento provocando así que los efluentes tengan una insuficiente calidad de PTAR contaminando así los ecosistemas de hábitats acuático y marinos por la introducción de elementos tóxicos o un exceso de nutrientes que podría provocar eutrofización, por otro lado, el consumo representa un riesgo de salud pública porque pueden provocar infección parasítico, vírica y bacteriana (SUNASS, 2008). Los vertimientos industriales también llegan a parar a los PTAR por los sistemas de alcantarillado con alta carga orgánica, metales pesados, ácidos y bases que perjudican a procesos de tratamiento biológico (Méndez & Marchán, 2007) “El Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento” (MINVIV) está impulsando a que exista normativa de Límites Máximos Permisibles (LMP) mediante el “Reglamento de Desagües Industriales aprobado por Decreto de Ley N° 28-60 SAPL” de 1960, para industrias que vierten en los sistemas de alcantarillados y SUNASS por su parte está

incentivando a que exista tratamiento de aguas en el ambiente industrial. (SUNASS, 2008).

1.3 Las Aguas Residuales

Los efluentes que se originan en las zonas urbanas son producto de las viviendas producto de las actividades y metabolismo humanos estos por lo general presentan características bastantes uniformes a pesar de traer consigo desechos de inodoro fregadero, por otro lado, los efluentes industriales sí muestran una gran diversidad de contenido por los diferentes rubros y procesos productivos que se realizan, los efluentes de las actividades agrícolas aportan a la acumulación de nutrientes, fertilizantes, herbicidas, etc. (Bendicho & Lavilla, 2005). En la tabla 1 se presenta la clasificación de las aguas grises según su origen según Cortez, *et al* 2010:

Tabla 1. Clasificación de aguas residuales

Domésticas	Municipales	Mercantil	Industriales	Agrícolas
Provenientes del uso cotidiano agua en las viviendas	del Son el producto de las actividades municipales en beneficio de la sociedad	Descargas producto de restaurantes, centros comerciales, etc.	Las aguas usadas para los procesos de producción.	Son las aguas que escurren después del uso en los cultivos

Fuente: Cortez 2010.

Las aguas residuales industriales presentan diferentes compuestos entre ellos puede ser tóxicos, metales pesados, compuestos orgánicos volátiles y también contenidos similares que hay en las aguas residuales domésticas, por esto es necesario que los efluentes industriales tengan tratamientos previos para eliminar los tóxicos (Bendicho & Lavilla, 2005).

1.4 Parámetros que caracterizan las aguas residuales

La caracterización de las aguas de PTAR nos permitirán saber cuál es el tratamiento adecuado para poder hacer un buen manejo de estos. En la tabla 2 muestras los parámetros y contaminantes que se deben caracterizar o tener en cuenta en su composición.

Tabla 2. Parametros y contaminantes

Parámetros	Unidades mgL^{-1}
Alcalinidas (Na_2CO_3)	50-200
Sólidos totales (ST)	350-1200
Sólidos Totales Suspendidos (STS)	100-350
Sólidos Totales Disueltos (STD)	250-850
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)	110-400
Demanda Química de Oxígeno(DQO)	80-290
Carbono Organico Total (COT)	80-290
Nitrogeno Total Kjeldahl	20-85
Surfactante	2-6
Amonio	12-50
Nitratos	0.1-0.4
Nitritos	0-0.1
Fósforo total	4-15
Fosforo inorgánico	3-10
Cadmio (Cd)	6-85 μgL^{-1}
Cobre (Cu)	20-900 μgL^{-1}
Cromo (Cr)	0.5-7100 μgL^{-1}
Mercurio (Hg)	<1-8 μgL^{-1}
Plomo (Pb)	<1-5000 μgL^{-1}
Níquel (Ni)	0.5-170 μgL^{-1}
Zinc (Zn)	12-3200 μgL^{-1}
Arsenico (As)	2 μgL^{-1}
Cloruros	30-100
Sulfato	20-50
Antibioticos	0-2,32 μgL^{-1}
Análgesicos y antiinflamatoria	0-23 μgL^{-1}
Triclosan	0-2 μgL^{-1}
Fenoles	0.5-1
Bisfenol A	-012 μgL^{-1}

Ftalato de dibutilo (D BP)	0-472 μ gL ⁻¹
Patógenos	10 ⁶ – 10 ⁹

Fuente: Mudge & Ball, 2005

1.5 Proceso de Tratamiento de Aguas Residuales

Los procesos para poder tratar aguas servidas consta de cuatro procesos básicos como el pretratamiento en la cual se remueve los compuestos u objetos grandes por medio de rejillas, el tratamiento primario consta de la sedimentación de la materia orgánica que consta de un tiempo de una hora a una hora y media por la acción de los floculantes reduciendo la carga de DBO₅, el tratamiento secundario o biológico la acción de microorganismo que degradan materia orgánica en un medio aeróbico esto puede ser por la inyección de oxígeno por distintas tecnologías y finalmente el tratamiento terciario es la defunción de patógenos o elementos en específico como el fosforo o nitrógeno (Reynolds, 2002).

En la figura 2. Las aguas sin tratamiento son convergidas a una misma unidad en la cual se da la eliminación de escombros y las arenas, después los sólidos suspendidos pasan a sedimentarse a esta etapa se le conoce como sedimentación primaria, y el efluente pasa para al proceso de tratamiento biológico en tanques que puede ser filtros por goteo, procesos con lodos activados, a partir de ello se da la sedimentación secundaria estos son reciclados al sistema de lodos activados, el efluente pasa a un tratamiento terciario donde se da la maduración del efluente, filtros de arena y cloración (Ferrer *et al*, 2018).

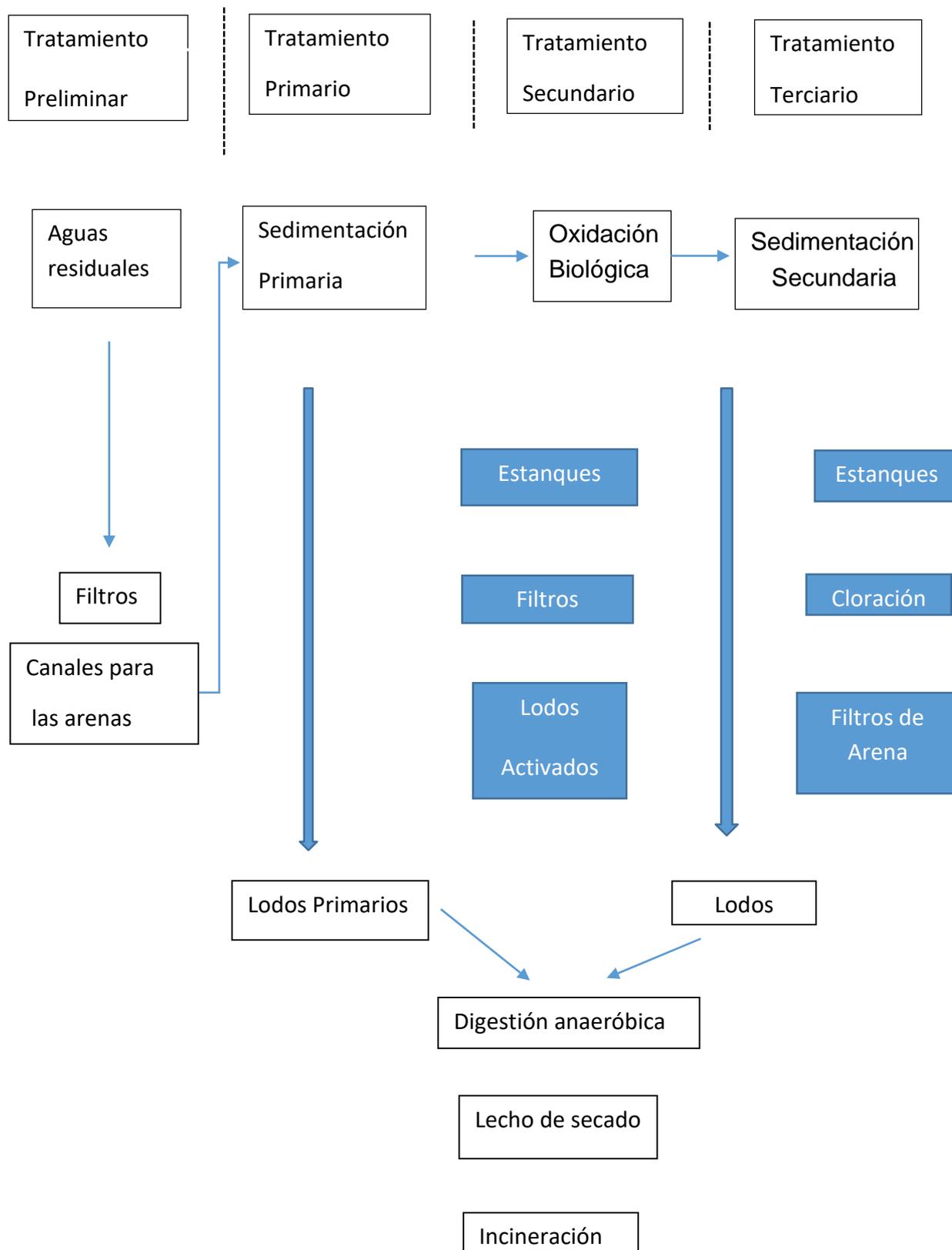


Figura 2. Tratamiento de aguas residuales y sus métodos que podrían adaptarse.

Fuente. (Ferrer *et al*, 2018)

2. Lodos Residuales

En los PTAR son los lodos el principal residuo, estos contienen microorganismos patógenos y virus, por esto es necesario su tratamiento por representar riesgo de salud pública y ambiental (Rojas-morales et al., 2016). Estos también pueden ser conocidos como biosólidos con características líquidas o semisólidos, provenientes de tratamientos primario, secundario y terciario (Castro *et al.*, 2007) . En la tabla 3 se muestra la clasificación de los lodos el cual puede ser aplicada directamente al suelo en base a sus características.

Tabla 3. La clasificación de lodos según sus características sanitarias.

Lodos tipo A	Lodos tipo B
Estos lodos pueden ser aplicados a suelos porque le brindarían diversos beneficios. Es decir estos tienen E. coli fecales < 1000NMP/g lodo.	Aptos para aplicación a suelos con beneficios con restricciones según la localización del suelo E. coli fecales < 2000 NMP/g lodo.

*NMP (número más probables).

Fuente. Castro et al (2007).

Los lodos residuales generados por PTAR necesitan pasar por un proceso de estabilización para lograr la reducción riesgos sanitarios, es por ello que, se debe realizar la caracterización física, química y bacteriológica para así poder aplicar la medida de gestión adecuada, porque usualmente estos lodos tienen disposición final en los rellenos sanitarios y hasta botaderos estos son capaces de generar malos olores, biogás y lixiviados (Cáceres, 2015).

2.1 Caracterización de los Lodos de PTAR

La caracterización de los lodos permite saber si estos son identificados como peligrosos o no, para así poder determinar mejor el método de manejo, se sabe también que las características dependen de la fuente u origen. En la tabla 4 se presenta las características mínimas que se deben tomar en cuenta al caracterizar los lodos.

Tabla 4. Composición y características de los lodos de PTAR

Parámetros	Lodos primarios	Lodos secundarios	Lodos diregeridos
pH	5.5-6.5	6.5-7.5	6.8-7-6
Contenido de agua (%)	92-96	97.5-98	94-97
Sólidos Suspendedos	70-80	80-90	55-65
Volátiles (%SSV)			
Grasas (%)	12-14	3-5	4-12
Proteínas (%)	4-14	20-30	10-20
Carbohidratos (%)	8-10	6-8	5-8
Nitrógeno (%)	2-5	1-6	3-7
Fósforo (%)	0.5-1.5	1.5-2.5	0.5-1.5
Bacterias patógenas (NMP/100ml)	$10^3 - 10^5$	100-1000	10-100
Metales pesados (%) (Zn, Cu, Pb)	0.2-2	0.2-2	0.2-2

Fuente. Hernández, 1992.

2.2 Manejo de Lodos en Perú

El 05 de abril del 2017 mediante “Resolución Ministerial N°128-2017-Vivienda” donde se aprobaron las condiciones mínimas para la gestión de los lodos y donde se dará lugar a su disposición final, el proceso de manejo de lodos se da por las etapas de recolección, almacenamiento, tratamiento, reaprovechamiento, transporte y disposición final, para las industrias este manejo está dispuesto en su Instrumento de Gestión Ambiental (MINVIV, 2017).

Por otro lado, mediante “Decreto Supremo N°015-2017-Vivienda se aprobó el Reglamento de Lodos Generados en Las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales”, en la cual se habilita de mezclar lodos con sustratos ser usados en el mejoramiento de suelos (MINVIV, 2017).

3. Tratamiento de Lodos

3.1 Compostaje

Una forma de poder darle un valor agregado a los lodos es mediante el compostaje, este proceso es capaz de eliminar patógenos, consta de procesos de biológicos aerobios para la oxidación respectiva de la materia orgánica en la cual los microorganismos son los actores principales (Vicencio, et al., 2011). En este proceso la temperatura es mayor a 50 °C, provocando así la inactivación de los patógenos obteniendo así un producto con mayores beneficios (Ferrer *et al*, 2018).

Para la realización de compostaje es necesario la realización de pilas la cual consiste en agrupar montículos con criterios de buena aireación esto pueden ser pilas estáticas en la cual la inyección de aire se hace de manera mecánica, por otro lado, están las pilas dinámicas la aireación es por procesos naturales a través de volteos de las pilas y las pilas cerradas se hace en un digestor en la cual se puede acelerar los procesos pero este es de altos costos (Zapata, 2014). Este tipo de tratamiento. Figura 3. Ejemplo de distribución de materiales para la realización de pilas de compostaje.

Residuos de jardín
Lodo
Hojarasca de algarrobo
Residuos de jardín
Lodo
Hojarasca de algarrobo

Figura 3. Pila común de compostaje de lodos de PTAR. Fuente. Zapata, 2014.

3.2 Mejoramiento del suelo

Para este tipo de aplicación de lodos es necesario saber las condiciones sanitarias en las que se encuentran los lodos para su aplicación directa en las actividades agrícolas, aquí es necesario saber las características del suelo y las de los lodos ya que al aplicar se debe tomar en cuenta que parámetros podrían variar después de su aplicación (Francisco, Ramos, & Aguirre, 2011). Antes de su aplicación estos lodos suelen ser tratados usualmente con $FeCl_3$ y $Ca(OH)_2$ y seguidamente son secados por un equipo filtro-prensa. Este manejo presenta limitaciones entre la aplicación de lodos y su degradación, ya que estas son capaces de producir procesos metabólicos que afectan durante el desarrollo y crecimiento de las plantas. (Zucconi et al., 1981).

La presencia de los lodos en los suelos provoca un mejor balance hídrico, una buena capacidad de intercambio catiónico, alto contenido de materia orgánica, asimismo el aumento

de nutrientes como fósforo y nitrógeno; la existencia de la relación carbono nitrógeno en el suelo se puede ver alterada provocando así la presencia del amoníaco y por ende la competencia por el nitrógeno por parte de los microorganismos y plantas. El aumento de nitrógeno en los suelos por la presencia de los lodos hace que el suelo sea más fértil, existe el control de pH del suelo, hay una mejor asimilación de potasio por parte de las plantas (Andrade et al., 2000).

Este tipo de enmiendas provocan cambios a corto plazo como es la macroporosidad es decir se da un mejor movimiento del agua y aire a través del suelo, además podría asegurarse que un lodo compostado puede tener el mismo efecto, sus mejores respuestas se ven en cultivos de gramíneas, las desventajas de esta práctica es que se forma una repelencia al agua provocando que haya baja infiltración del agua y por tanto un arrastre de sólidos por el fluido, asimismo el aumento de la conductividad eléctrica en los suelos (Cuevas et al., 2009).

3.3 Incineración de lodos para absorber metales

En un estudio realizado en China se comprobó la capacidad adsorptiva de plomo (II) por el lodo después de haber sido sometido a incineración. Los métodos más comunes la eliminación de los metales pesados es el ion intercambio, electrodiálisis, filtración mediante membranas, precipitación química y adsorción (Koby & Demirbas, 2005)

El método de adsorción tiene una mejor persuasión por su fácil aplicación y eficiencia entre los cuales pueden incluir los activados (carbón y biochar) los cuales son de alto costo y demanda de energía para su obtención, es por ello, en la búsqueda de nuevas alternativas para tener otras fuentes de materia prima de característica de adsorbente los residuos industriales tienen cuenta con un buen potencial estos pueden ser de las cenizas de carbón hasta la escoria de acero los cuales demuestran la gran capacidad de adsorción de metales pesado (Wang, Li, & Poon, 2019).

Las cenizas de lodo de PTAR que pasaron por el proceso de incineración contienen características similares a las cenizas de un carbón, estos lodos ya deshidratados tienen buena cantidad de superficies porosas, siendo caracterizado como potente absolvedor (Pan y Tseng, 2001). Es por ello que en la tabla 5 se presenta los componentes de un lodo incinerado.

Tabla 5. Componentes de un lodo de PTAR incinerado

Componentes dominantes	Componentes
Óxidos de silicio	Óxidos de ferrico
Óxidos de aluminio	Oxido cálcico
	Fosfato

Fuente. Wang, Li, & Poon, 2019

Por los componentes con los que cuenta las cenizas de lodos son reconocidos con una alta eficiencia de remoción de metales pesados (Zhang et al., 2018). Además, es necesario conocer sus propiedades física y químicas como muestra la tabla 6.

Tabla 6. Propiedades físicas y químicas de las cenizas de lodos de PTAR.

Ítem	Parámetro	Valor
Físico	Densidad g/cm^3	2.49
	Superficie específica m^2/g	1.83
	Pérdida por ignición (%)	0.99
Químico (%)	pH	8
	Na ₂ O	6.96
	MgO	2.73
	Al ₂ O ₃	15.24
	SiO	33.90
	P ₂ O ₅	9.33
	K ₂ O	2.74
	CaO	7.45
Fe ₂ O ₃	16.42	

ZnO	0.5
CuO	0.15
Cr2O3	0.05
NiO	0.02

Fuente. Wang et al., 2019

4. Obtención de carbón activado

El carbón activado presenta una estructura porosa los cuales le dan la capacidad de adsorción de moléculas presentes en gases o líquidos, su aplicación se da en los procesos terciarios de aguas residuales, control de olores, soportes catalíticos, etc. (Carriazo, Saavedra, & Molina, 2010). Estos son elaborados con materiales con alto contenido de carbono como madera, cascarillas de frutos, etc., pero los más comerciales están elaborados a base de minerales como las breas, turba y coque (Luna et al., 2007). Ante este escenario se busca la necesidad de buscar nuevas alternativas para la elaboración de carbón activado, ya que se sabe que los minerales son recursos no renovables (Cruz et al., 2016). Entre las otras alternativas se encuentran el uso de cascara de coco, desechos agrícolas, residuos agroindustriales, semillas, lodos de PTAR, siendo este último como alternativa de reutilización de los residuos después de un proceso de tratamiento de agua residual, ya que este presenta alto contenido de carbono (Rojas-morales et al., 2016). Así, en otros procesos productivos del sector industria se generan desechos de endocarpio de los vegetales, es decir materiales ricos en carbono, convirtiéndose, así como insumo y valor agregado, para proporcionar un mejor manejo ambiental de residuos (Bastidas et al., 2010)

En otros estudios realizados en la aplicación carbón activado a partir de los residuos de PTAR prueban que este carbón es capaz de remover contaminantes como sulfuro de hidrogeno (H₂S), aminas, safranina, tetracloruro de carbono, fenol, cobre, azul de metileno, mercurio, colorante cristal violeta, compuestos orgánicos volátiles entre otros (Gonzales et al., 2014). La eficiencia de la aplicación del carbón depende del tipo de materia del que se

elaboró, como se activó, su estructura está basada en la presencia de microporos, mesoporos y macroporos (García & Granillo, 2017). La activación del carbón se da en forma física y química. El proceso de activación es ordenar los átomos de carbono para obtener una estructura cristalina, es decir tener una estructura muy porosa. Como se muestra en la figura 4.

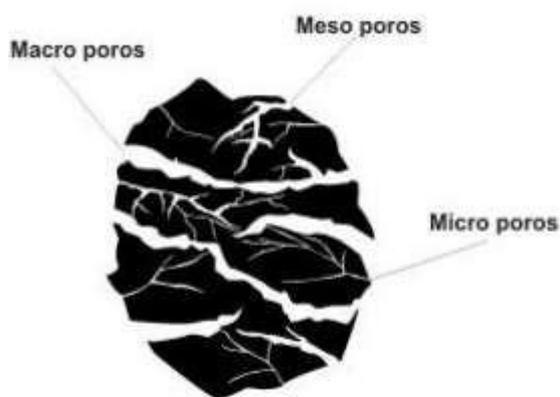


Figura 4. Estructura porosa del carbón activado. Fuente de la Torres, et al. (2011)

EL proceso de activación física consiste en la oxidación de la materia prima entre, la temperatura puede variar dependiendo de la materia prima, pero normalmente la temperatura es de 800°C y la presencia de agentes oxidantes los cuales pueden ser dióxido de carbono (CO₂) y vapor de agua para dar lugar así a la porosidad (Carrillo, 2013). Donde se dan las siguientes reacciones:



Para la activación química se usan los reactivos cloruro de zinc (ZnCl₂), Ácido fosfórico (H₃PO₄), Carbonato de potasio (K₂CO₃) para la impregnación para después se llevar a la etapa carbonización a 400°C y 900°C, este tipo de activación es capaz de generar mayor

porosidad que el físico ya que en este se dan reacciones de deshidratación y oxidación.

Acerca de los gases oxidantes como el K_2CO_3 y $ZnCl_2$ no presentan riesgos ambientales son reducidos en la atmósfera inerte y no son corrosivos. Cabe resaltar también que son de bajos costos (Guarín, Sierra, & López, 2014).

4.1 Metodologías Para Obtener Carbón Activado y Capacidad de Adsorción

En un estudio realizado en Chile para poder obtener carbón activado, se tomaron muestras de lodos de PTAR de aeropuerto Arturo Merino Benítez de Chile, en la cual se hizo un secado del lodo aproximadamente $105^\circ C$, para después ser activado con $3M ZnCl_2$ usaron este reactivo porque en otros estudios se logró una buena adsorción del mercurio durante 24 horas, para posteriormente ser secados a $105^\circ C$, seguidamente de esto se hizo la pirolisis ($550, 600$ y $650^\circ C$) en tiempos de 35, 60 minutos, seguidamente se pasó a un lavado con HCl 37% en constante agitación por 6 horas para luego ser lavado con agua para disminuir la conductividad hasta en 10 a 15ms y finalmente ser secado a una temperatura de $105^\circ C$. El rendimiento de adsorción de este carbón fue de 42 y 66 %, en la cual la pirolisis a $550^\circ C$ tuvo un mejor desempeño, en una prueba de adsorción lineal mediante el colorante cristal violeta donde el rendimiento de adsorción fue de (0,132L/g) en una pirolisis de $650^\circ C$ durante 45 minutos. (Moreno, Droppelmann, & Verdejo, 2006).

Otro estudio realizado en Venezuela, usaron muestras de lodos de PTAR de una industria avícola, la cual se realizó un secado a $105^\circ C$ y para la impregnación H_3PO_4 al 10, 20 y 30 % con una agitación de dos horas a $85^\circ C$, para después ser secado a $105^\circ C$, se llevó a pirolisis a $450^\circ C$ durante en atmósfera N_2 y se esperó dos horas para su enfriamiento, los carbones obtenidos fueron denominados C10, C20, C30 y C35 en la cual la capacidad de adsorción del lodo fue comparado con un carbón comercial usando el azul de metileno, esto se evaluó en función a la densidad aparente, pH, humedad y cenizas, en la cual el C35 proveniente de

PTAR tuvo un rendimiento de 88.44% y el carbón comercial de 86.43% (Rojas-morales et al., 2016).

En Gran Bretaña la preparación de carbón activado provino de los lodos de Kranji triado desde Singapur, la muestra fue secada a 103°C en un rango de 24 a 36 horas, seguidamente fue triturado y tamizado para la aplicación de ZnCl₂ 5M para la impregnación la cual llevo 24 horas a una temperatura ambiente, posteriormente se pasó al secado a 103°C para proceder con la pirolisis con nitrógeno purificado durante dos horas en una temperatura de 500°C y finalmente se lavó con HCl 3M y agua destilada para pasar al secado final a 103°C por 24 horas; las características de este carbón fueron de mesoporos y su capacidad de absorción se determinó con fenol y CCl₄ en la cual se vio un potencial de lodo creado después de evaluar su capacidad de remoción.(Chen, Jeyaseelan, & Graham, 2002).

En Canadá, las muestras recogidas de lodos de una zona aeróbica de una planta piloto de PTAR, en cual paso por un proceso de centrifugado a 105°C, después se paso a triturar y un empapado de 5M ZnCl₂ durante 24 horas, luego se pirolizo a 500°C en un horno eléctrico. Las pruebas de absorción fueron con los compuestos orgánicos hidrófobos (COH), asimismo hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) con eficiencia de 70 a 2800mg/g. (Li & Bj, 2017).

En China, el lodo fue secado a temperatura ambiente durante tres días, luego este fue calentado a 75°C, después se impregno con KOH, H₃PO₄ y ZnCl₂ para la activación química el cual duro 24 horas, luego se hizo uso de un microondas a 105°C, luego se pasó a un enfriamiento y un breve lavado con agua y ácido clorhídrico, las pruebas de absorción se hicieron en aguas residuales de un matadero, en la cual determino como mejor activador en este medio a H₃PO₄ (Wu et al., 2014).

Asimismo, en China la muestra fue de lodos de PTAR municipal el cual fue secado a 110°C durante 24 horas y se carbonizo a 450°C, luego se pasó a la activación a 6M ZnCl₂ durante 5 horas a 85°C y posteriormente se pasó a secar a 105°C por 12 horas, el proceso de pirolisis fue a 750°C durante 2 horas, luego se hizo lavado de HCl 3M y agua para finalmente secar a una temperatura de 105°C, las pruebas de adsorción fue con formaldehidos teniendo resultados 498mg/m³ (Wen et al., 2011).

En Japón, también se reutilizo los lodos de PTAR, en el cual tuvo tres activadores químicos ZnCl₂, H₃PO₄, H₂SO₄. El proceso de secado fue a 105°C durante 24 horas, las impregnaciones con cada uno de los activadores fueron de 24 horas cada uno, luego se piroliso a 650°C, para luego ser lavado con HCl y el secado final a 105°C, las pruebas de adsorción se hicieron con mercurio (Hg), la efectividad de estos se vio en la adsorción Hg (II) pero esto dependió del pH y se determinó que existía una relación directa entre el pH y la efectividad adsorción, es decir a mayor pH mayor eficiencia (Zhang, Nriagua & Itoh, 2005).

Tabla 7. Comparaciones de activadores en diversos estudios

País	Activadores	Componente adsorvido
Chile	3M ZnCl ₂	Cristal Violeta
Venezuela	H ₃ PO ₄	Azul de Metileno
Gran Bretaña	5M ZnCl ₂	Fenol y CCl ₄
Canadá	5M ZnCl ₂	COH/HAP
China	H ₃ PO ₄	Aguas Residuales de Matadero
China	6M ZnCl ₂	Formaldehido
Japon	ZnCl ₂ , H ₃ PO ₄ , H ₂ SO ₄	Hg (II)

Fuente. Elaboración Propia

CONCLUSIONES

La obtención de carbón activado a partir de lodos residuales de PTAR representa como una alternativa sostenible, bajo costo y tiempo; ya que se aprovecha los lodos que básicamente se tienen pocas opciones de manejo porque sus disposiciones finales muchas veces son un relleno sanitario y poder darle un valor agregado para poder controlar olores, tratar aguas residuales y aplicación en otros escenarios; sin embargo, en Perú no existe normativa ni protocolos para realizar este tipo de proyectos tanto en el sector público y privado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANA. (2009). *V Foro Mundial del Agua. Informe país.*
- Andrade, M., Marcet, P., Reyzábal, M., & Montero, M. (2000). *Contenido, evolución de nutrientes y productividad en un suelo tratado con lodos residuales urbanos. Edafología*, 7(3), 2-29.
- Bastidas, M., Buelvas, L., Márquez, M., Rodríguez, K. (2010). *Producción de Carbón Activado a partir de Precursores Carbonosos del Departamento del Cesar, Colombia.* Información Tecnológica, 21 (3), 87-96. doi:10.1612/inf.tecnol.4289it.09
- Cáceres, I. R. (2015). Universidad nacional del altiplano. *ITesis UNA*, 1-254. Recuperado de http://tesis.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/2383/Oblitas_Huayllapuma_Elizabet_h_Quinto_Apaza_Deyse.pdf?sequence=1
- Carriazo, J., Saavedra, M., Molina, M. (2010). *Propiedades adsorptivas de un carbón activado y determinación de la ecuación de Langmuir empleando materiales de bajo costo. Educación Química*, 21 (3), 224-229.
- Castro, C. P., Henríquez, O., & Freres, R. (2007). *Posibilidades de aplicación de lodos o biosólidos a los suelos del sector norte de la Región Metropolitana de Sa. Revista de Geografía Norte Grande*, 37, 35-45.
- Carrillo, V. Y. (2013). *Elaboración de un filtro a base de carbon activado obtenido del endocarpo de coco. Universidad De El Salvador.*
- Chen, X., Jeyaseelan, S., & Graham, N. (2002). *Physical and chemical properties study of the activated carbon made from sewage sludge. Waste Management*, 22(7), 755-760. [https://doi.org/10.1016/S0956-053X\(02\)00057-0](https://doi.org/10.1016/S0956-053X(02)00057-0)
- Cortes, F., Betancourt, F., Medrano, J. (2010). *Control Inicial en la Descarga de Aguas*

Residuales Industriales y Comerciales. Conciencia Tecnológica, núm. 39, pp. 43-49.
 Instituto Tecnológico de Aguascalientes Aguascalientes, México.

Cruz, G.J., Velásquez, M., Santiago, J., Solís, J., Gómez, M., Keiskid. (2016). *Estudio de carbones activados impregnados con quitosano y su comparación con carbones comerciales*. Revista de la Sociedad Química del Perú, vol. 82 (septiembre), 373-384.

Cuevas B, J., Seguel S, O., Ellies Sch, A., & Dörner F, J. (2009). *Efectos De Las Enmiendas Orgánicas Sobre Las Propiedades Físicas Del Suelo Con Especial Referencias a La Adición De Lodos Urbanos*. Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal, 6(2), 1-12. <https://doi.org/10.4067/s0718-27912006000200001>

Ferrer, J., Seco, A., Robles, A. (2018). *Tratamiento biológico de aguas residuales*. Valencia: Editorial Universitat Politècnica de Valencia. (14)

Francisco, J., Ramos, P., & Aguirre, G. (2011). *Aprovechamiento agrícola del lodo generado en la PTAR de Puente Piedra - Lima*. Sociedad Química del Perú, 77(1), 75-85.

García, R., & Granillo, Y. (2017). *Evaluación de las condiciones operacionales en el proceso de preparación de carbón activo de cáscara de naranja valencia (Citrus Sinensis Linn Osbeck)* (tesis de pregrado). Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua Recuperado de <http://repositorio.unan.edu.ni/4275/1/96798.pdf> (35)

Gonzales, F., Del Ángel, E., & González, A. (2014). *Propuesta de reutilización de Lodos Provenientes de Planats de Aguas Residuales*. Kuxulkab, XX(39), 17-23.

Guarín, V., Sierra, R., & López, D. (2014). *Preparación y caracterización de carbón activado a partir de torta de higuera*. Revista Tecno Lógicas, 17(32), 75-84. Recuperado de <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4756272>

- Hernández, M. A. (1992). *Depuración de aguas residuales*. Servicio de publicaciones de la escuela de ingenieros de caminos de Madrid, España, p. 713.
- Kobyá, M., & Demirbas, E. (2005). *Adsorption of heavy metal ions from aqueous solutions by activated carbon prepared from apricot stone*. 96, 1518-1521. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.12.005>
- Luna, D., Gonz, A., Gordon, M., & Mart, N. (2007). *Obtención de carbón activado a partir de la cáscara de coco*. *Dyna*.
- Li, L. Y., & Bj, K. (2017). *Adsorption of organic stormwater pollutants onto activated carbon from sewage sludge*. 197, 490-497. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.04.011>
- Méndez Vega, J. P., & Marchán Peña, J. (2007). *Estudio-Diagnóstico situacional de los sistemas de tratamiento de aguas residuales en las EPS del Perú y propuestas de solución*. 23–45. Retrieved from https://www.sunass.gob.pe/doc/Publicaciones/libro_ptar_gtz_sunass.pdf
- Ministerio de Agricultura y Riego. (2014). *Huella Hídrica del Perú*. 32. <https://doi.org/10.1111/j.1365-263X.2011.01212.x>
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2017). *DS N°015 – 2017-Vivienda*. Recuperado de <http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/06/DS-015-2017-VIVIENDA.pdf>
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2017). *R.M. N° 128-2017-Vivienda*. Recuperado de <https://busquedas.elperuano.pe/normaslegales/-fe-de-errata-rm-n-128-2017-vivienda-1510907-1/>
- Mudge, S. M., & Ball, A. S. (2005). *Sewage. Environmental Forensics: Contaminant Specific Guide*, (August), 35–53. <https://doi.org/10.1016/B978-012507751-4/50025-2>

- Moreno, H. A., Droppelmann, C. V, & Verdejo, M. E. (2006). *Evaluación de Carbón Activado Producido a partir de Lodo Generado en una Planta de Tratamiento de Aguas Servidas. Información tecnológica*, 17(3), 9-14. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642006000300003>
- Organización de las Naciones Unidas. (2015). *Implementación de mejoras para la calidad del agua y la protección de servicios ecosistémicos*. Recuperado de https://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/waterandsustainabledevelopment2015/pdf/04%20risk_water_quality_esp_web.pdf
- Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. (2017). *Informe Mundial sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas 2017: Aguas residuales, el recurso desaprovechado* (356). Recuperado de <http://www.unesco.org/new/es/natural-sciences/environment/water/wwap/wwdr/2017-wastewater-the-untapped-resource/>
- Pan, S.C., Tseng, D.H. (2001). *Sewage sludge ash characteristics and its potencial applications*. *Water Sci. Technol.* 44, 261-267.
- Raschid, L. y Jayakodoy, P. (2008). *Drivers and Characteristics of Wastewater Agriculture in Developing Countries: Results from a Global Assessment*. IWWMI Informe de Investigación N° 127. Colombo, Instituto Internacional de Gestión de Recursos Hídricos (IWWMI).
- Reynolds, K. A. (2002). *Tratamiento de Aguas Residuales en Latinoamérica. De La Llave*, 4. Retrieved from http://cidta.usal.es/cursos/EDAR/modulos/Edar/unidades/LIBROS/documentos_nuevos/DeLaLaveSepOct02.pdf
- Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento. (2008). *Diagnóstico situacional de*

los sistemas de tratamiento de aguas residuales en las eps del Perú y propuestas de solución. Recuperado de

https://www.sunass.gob.pe/doc/Publicaciones/libro_ptar_gtz_sunass.pdf

Rojas-morales, J., Gutiérrez-González, E., & Colina-Andrade, G. (2016). *Obtención y caracterización de carbón activado obtenido de lodos de plantas de tratamiento de agua residual de una industria avícola. Ingeniería Investigación y Tecnología, XVII(4), 453-462.*

Torres, J., Benavides, A., Ramírez, H., Torres, V., González, J., & Díaz, V. (2011). *Aplicación de lodo industrial crudo en la producción de Liliun sp. EN INVERNADERO. Terra Latinoamerica, 29(4), 467-476.*

Vicencio-de la Rosa, G., Pérez-López, E., Medina-Herrera, E., & Martínez-Prado, A. (2011). *Producción de composta y vericomposta a partir de los lodos de la planta de tratamiento de aguas residuales de un Rastro. Revista Internacional de Contaminación Ambiental, 27(3), 263-270.*

Wang, Q., Li, J., & Poon, C. S. (2019). *Chemosphere Using incinerated sewage sludge ash as a high-performance adsorbent for lead removal from aqueous solutions : Performances and mechanisms. Chemosphere, 226, 587-596.*
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.03.193>

Wen, Q., Li, C., Cai, Z., Zhang, W., Gao, H., Chen, L., ... Zhao, Y. (2011). *Bioresource Technology Study on activated carbon derived from sewage sludge for adsorption of gaseous formaldehyde. Bioresource Technology, 102(2), 942-947.*
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.09.042>

Wu, L., Zhang, X., Liu, D., Peng, H., & Long, T. (2014). *Activated Carbons Derived from Livestock Sewage Sludge and Their Absorption Ability for the Livestock Sewage. IERI*

Procedia, 9, 33-42. <https://doi.org/10.1016/j.ieri.2014.09.037>

Yee-Batista, C. (2013). *Un 70% de las aguas residuales de Latinoamérica vuelven a los ríos sin ser tratados*. Banco Mundial, BIRF – AIF. Recuperado de <https://agua.org.mx/un-70-de-las-aguas-residuales-de-latinoamerica-vuelven-a-los-rios-sin-ser-tratadas/>.

Zapata, E. C. (2014). *Propuesta De Compostaje De Los Lodos Removidos De Las Lagunas De Estabilización De La Universidad De Piura*.

Zhang, Z., Wang, X., Wang, H., & Zhao, J. (2018). *Removal of Pb (II) from aqueous solution using hydroxyapatite / calcium silicate hydrate (HAP / C-S-H) composite adsorbent prepared by a phosphate recovery process*. *Chemical Engineering Journal*, 344(March), 53-61. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.03.066>

Zhang, F., Nriagu, J. O., & Itoh, H. (2005). *Mercury removal from water using activated carbons derived from organic sewage sludge*. 39, 389-395. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2004.09.027>

Zucconi, F., Pera, A., Forte, M., Monaco, A., De Bertoldi, M. (1981). *Evaluating toxicity of immature compost*. *BioCycle* 27-29