

LOS LODOS DE LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES, ¿PROBLEMA O RECURSO?

Especialidad: Ingeniería Química

Juan Gualberto Limón Macías

08 de Julio de 2013

Guadalajara, Jalisco

CONTENIDO

1.	Resumen Ejecutivo.....	3
2.	Introducción.....	6
2.1.	El saneamiento en México, avances y retos.....	6
2.2.	Tecnologías aplicables y tamaños de plantas.....	8
2.3.	Los subproductos en el tratamiento de aguas residuales.....	9
3.	Producción de lodos en el tratamiento de aguas residuales.....	10
3.1.	Origen.....	10
3.2.	Cantidad y características.....	11
3.3.	Normatividad que deben satisfacer.....	13
NOM-004-SEMARNAT-2002.....		13
NOM-083-SEMARNAT-2003.....		15
3.4.	Problemática en el manejo y disposición de lodos.....	18
Estabilización de lodos.....		18
Desaguado de lodos.....		19
Disposición de lodos.....		20
4.	Oportunidades de aprovechamiento y disposición.....	22
4.1.	Fuente de energía.....	22
Producción y características del biogás.....		23
Cogeneración de energía eléctrica.....		25
4.2.	Aprovechamiento en la agricultura.....	26
Criterios de diseño.....		28
Restricción de cultivos cuando se incorporan biosólidos.....		30
4.3.	Experiencias favorables en México.....	32
5.	Conclusiones y recomendaciones.....	37
6.	Referencias.....	38
7.	Bibliografía.....	40
8.	Agradecimientos.....	42
9.	Currículum Vitae del candidato.....	43

1. RESUMEN EJECUTIVO

En diciembre de 2011, México contaba con una cobertura de saneamiento del 46.5% de las aguas residuales colectadas en los sistemas de alcantarillado (Comisión Nacional del Agua, 2011).

Uno de los grandes retos a largo plazo, es tratar todas las aguas residuales generadas en el país, lo cual fue establecido como objetivo en la Agenda del Agua 2030.

Existen numerosas tecnologías utilizadas en el tratamiento de aguas residuales. El tratamiento generalmente consiste en las etapas de pretratamiento, tratamiento primario, tratamiento secundario, desinfección y tratamiento de lodos.

El tratamiento secundario es la parte más importante del proceso, ya que es donde, por medio de microorganismos, se remueve la materia orgánica contenida en el agua residual. Esta etapa puede llevarse a cabo de forma aerobia o anaerobia y la biomasa puede estar suspendida o adherida a algún medio.

La tecnología más comúnmente utilizada para el tratamiento de las aguas residuales municipales es la de lodos activados. En este proceso, se tiene una corriente de recirculación de lodo de los sedimentadores secundarios hacia el reactor biológico para mantener una concentración deseada de biomasa.

El tipo de tecnología a utilizar en cada planta de tratamiento, dependerá de muchos factores como el tamaño, la calidad deseada y los costos.

Como resultado de la remoción de contaminantes, en los procesos de tratamiento se producen diferentes subproductos, siendo el más importante los lodos. Los lodos provienen de las etapas de tratamiento primario y tratamiento secundario, y sus características dependen del proceso donde se originaron y del tratamiento que han recibido. El volumen y masa de éstos también depende del proceso donde se produjeron.

Los lodos producidos en una planta de tratamiento deben cumplir principalmente con dos Normas Oficiales Mexicanas. En la NOM-004-

SEMARNAT-2002 se especifican los límites máximos permitidos de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final, mientras que en la NOM-083-SEMARNAT-2003 se especifican las características de diseño, construcción y operación del sitio de disposición.

Para poder cumplir con lo especificado en la normatividad, los lodos deben ser tratados antes de disponerse, lo cual trae consigo varios problemas.

La etapa más importante del tratamiento de lodos es la estabilización, durante la cual se reduce la masa y volumen y se reducen los organismos patógenos, olores y la atracción de vectores. Los métodos más utilizados son la digestión aerobia y anaerobia.

La digestión aerobia se usa típicamente en plantas de tratamiento con capacidades menores a 220 l/s y presenta la desventaja de un elevado costo de operación, ya que requiere suministro de aire, que consume energía.

Por otro lado, la digestión anaerobia, aunque su costo de operación es menor, presenta el inconveniente de un mayor costo de inversión y que requiere de operadores especializados para mantener un buen control del proceso y que éste no se desestabilice.

La disposición de los lodos es también un gran problema, ya que se requieren grandes superficies de terreno o transportarlos a un sitio autorizado. Además del gran requerimiento de superficie, otros problemas son la vida útil del sitio y el manejo y tratamiento de los lixiviados ahí generados.

No obstante los problemas que trae el tratamiento y disposición de los lodos, éstos pueden traer grandes beneficios para las plantas de tratamiento y la población.

Los lodos pueden ser aprovechados como fuente de energía durante la etapa de digestión anaerobia en la que se produce biogás como subproducto del proceso. El biogás puede ser alimentado a una máquina de cogeneración para generar energía eléctrica y calorífica.

La energía eléctrica se usa para satisfacer parte de los requerimientos de energía de la PTAR y la energía calorífica para calentar el digestor hasta su temperatura de operación.

Además de la producción de energía, la cogeneración presenta la ventaja de reducir la emisión de gases de efecto invernadero al ambiente.

Los lodos estabilizados o biosólidos, también pueden ser utilizados como mejoradores de suelo en la agricultura. Éstos mejoran las características del suelo y proveen nutrientes esenciales para el crecimiento vegetal como nitrógeno, fósforo, níquel, zinc y cobre. Debido a sus ventajas, los biosólidos pueden utilizarse como sustituto de fertilizantes químicos.

En México, existen varias experiencias favorables de aprovechamiento de lodos, principalmente para cogeneración de energía. Algunas de estas plantas son: PTAR Atotonilco, PTAR Agua Prieta, PTAR El Ahogado y PTAR San Pedro Mártir I. Estas plantas cuentan con digestión anaerobia de lodos y se espera que produzcan entre el 69 y casi el 100% de la energía eléctrica que requieren una vez que estén operando al 100% de su capacidad.

En conclusión, los lodos producidos en las plantas de tratamiento, deben ser aprovechados para que no sólo sean un problema para la población y el medioambiente. Se debe evaluar su aprovechamiento en plantas de tamaño mediano, tanto en la agricultura como en la generación de energía, entre otros posibles aprovechamientos.

Palabras clave: biogás, cogeneración, estabilización, lodos, PTAR, saneamiento.

2. INTRODUCCIÓN

2.1. El saneamiento en México, avances y retos

En diciembre de 2011, México contaba con una cobertura de saneamiento del 46.5% de las aguas residuales colectadas en los sistemas de alcantarillado (Comisión Nacional del Agua, 2011). En este mismo mes, la cobertura de alcantarillado era de 90.2% (Comisión Nacional del Agua, 2012).

Aunque la mayoría de la población cuenta con sistemas de alcantarillado, el porcentaje de estas aguas que reciben tratamiento es muy bajo; ya que solamente alrededor de la mitad de ellas son tratadas.

No obstante este gran rezago en el tratamiento de las aguas residuales, México ha presentado grandes avances en los últimos años. Del año 2000 al 2011 la cobertura de tratamiento de aguas residuales se duplicó, lo que significa que en 11 años se construyó infraestructura de tratamiento para un caudal adicional mayor que el construido en toda la historia de nuestro país (Comisión Nacional del Agua, 2012).

La construcción y operación de un mayor número de plantas de tratamiento permite mejorar la calidad de vida de las personas en el país. Además que el mayor volumen de agua tratada se puede destinar para abastecer la demanda de sectores como el agrícola y el industrial, liberando importantes volúmenes de agua de primer uso para el consumo de la población.

En diciembre de 2011, el número de plantas de tratamiento era de 2,289, con una capacidad instalada de 137,082.13 l/s y un caudal tratado de 97,640.22 l/s (Comisión Nacional del Agua, 2011).

Adicional a estas plantas de tratamiento, en la actualidad se están construyendo otras nuevas, entre las más importantes por su capacidad, están la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Atotonilco y la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Agua Prieta, que permitirán incrementar la capacidad instalada en 43,500 l/s.

La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Atotonilco, en Atotonilco de Tula, Hidalgo, tendrá capacidad para tratar 23, 000 l/s en épocas de estiaje y 35,000 l/s en época de lluvias. Ésta será la planta de

tratamiento más grande de México y al 5 de junio de 2013, tenía un avance del 74% (Comisión Nacional del Agua, 2013).

La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Agua Prieta, ubicada en la Zona Conurbada de Guadalajara, Jalisco tendrá una capacidad instalada de 8,500 l/s y será la segunda más grande en México y la tercera en Latinoamérica. El 6 de abril de 2013, presentaba un avance del 86% (Gobierno del Estado de Jalisco, 2013).

Uno de los grandes retos a largo plazo para México, es tratar todas las aguas residuales generadas en el país. Esta meta fue planteada en la Agenda del Agua 2030, donde se estableció que para antes del año 2030, todas las aguas residuales municipales captadas en los sistemas de alcantarillado contarán con tratamiento (Comisión Nacional del Agua, 2011).

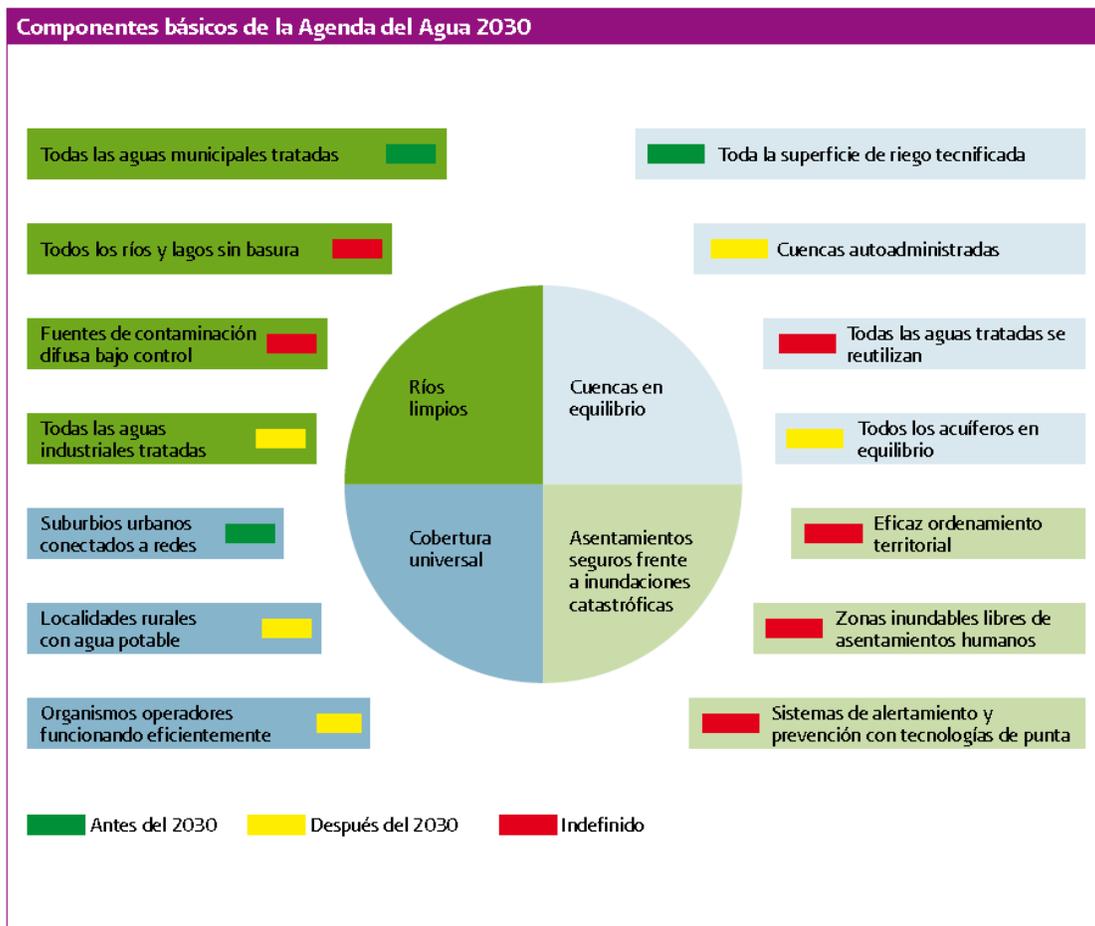


Figura 1 Componentes básicos de la Agenda del Agua 2030

Para lograr esta meta, se requerirá que los gobiernos municipales, con ayuda de los gobiernos estatales y el gobierno federal, garanticen la calidad y continuidad de este servicio.

Se requerirá la construcción de nuevas plantas de tratamiento así como la rehabilitación de una cantidad importante de las existentes que se han deteriorado por la falta de recursos. Un aspecto fundamental es la correcta operación de la infraestructura de saneamiento existente, esto requerirá de mecanismos novedosos y de la concurrencia de las autoridades municipales, estatales y federales para establecer los mecanismos técnicos, legales y económicos que la correcta operación de las plantas requieren.

2.2. Tecnologías aplicables y tamaños de plantas

Existe una gran variedad de tecnologías utilizadas en el saneamiento de las aguas residuales. Estas tecnologías se dividen principalmente en dos grupos, dependiendo del tipo de microorganismos que remueven la materia orgánica: procesos aerobios y procesos anaerobios.

Los procesos aerobios son los más comúnmente usados y se dividen principalmente en procesos con biomasa suspendida y procesos con biomasa adherida, aunque también existen algunos híbridos.

En los procesos con biomasa suspendida, siendo el más común el de lodos activados, los microorganismos se encuentran suspendidos o flotando libremente en el agua y se separan por medio de sedimentación o membranas. Estos requieren de una corriente de retorno de lodos activados para obtener la concentración de biomasa requerida en el reactor.

En los procesos con biomasa adherida, los microorganismos o biomasa forman una biopelícula que se adhiere a algún medio fijo o móvil. Dado que la biomasa está adherida, esta permanece en el reactor, sin embargo, a una concentración menor que en los procesos de biomasa suspendida.

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, menor producción de lodo y 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 la calidad de agua tratada requerida.

La tecnología a utilizar dependerá de muchos factores como el caudal a tratar, la calidad de agua cruda y agua tratada y los costos de inversión y operación y mantenimiento.

2.3. Los subproductos en el tratamiento de aguas residuales

Como resultado de la remoción de contaminantes del agua residual, se generan diferentes subproductos, principalmente basuras, arenas y lodos.

En el tratamiento preliminar de las aguas residuales, se cuenta con etapas de cribado y desarenación. El objetivo de estas etapas es remover los contaminantes que puedan dañar tuberías, bombas y otros equipos ubicados aguas abajo en el tratamiento.

El subproducto más importante en el tratamiento de aguas residuales, tanto por su volumen, como por el tratamiento posterior que requieren, son los lodos. Estos se producen principalmente en las etapas de tratamiento primario y tratamiento secundario del agua residual. Para poder disponerlos, es necesario estabilizarlos y desaguarlos para reducir la atracción de vectores y su volumen.

En las siguientes secciones se describe el origen de los lodos y sus características, la problemática en el manejo y disposición y las oportunidades de aprovechamiento y disposición.

3. PRODUCCIÓN DE LODOS EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

En el tratamiento de las aguas residuales se tienen principalmente dos tipos de lodos. El tipo depende del origen de los lodos, lo cual también hace que tenga ciertas características de acuerdo al tratamiento en el que se produjo. En esta sección se describen los principales tipos de lodos producidos en el tratamiento de aguas residuales, sus características, la normatividad en México que corresponde para su tratamiento y la problemática en el manejo y disposición.

3.1. Origen

Los lodos producidos en el tratamiento de aguas residuales dependen del tipo de planta de tratamiento y de la operación de ésta. En una planta de aguas residuales domésticas, los lodos se generan principalmente en las etapas de tratamiento primario y tratamiento secundario.

Los lodos primarios se producen en la sedimentación primaria, en la cual se remueven sólidos sedimentables. La cantidad depende de la carga superficial o tiempo hidráulico de retención. En la sedimentación primaria con químicos se produce más lodo, producto de una mayor remoción y de la precipitación química de la materia coloidal.

Los lodos secundarios se producen en procesos de tratamiento biológicos que convierten residuos o sustratos solubles en biomasa. También incluyen la materia particulada que permanece en el agua después de la sedimentación primaria y que se incorpora en la biomasa. La cantidad producida depende de varios factores: eficiencia del tratamiento primario, relación de SST a DBO, cantidad de sustrato soluble, remoción de nutrientes y criterios de diseño del tratamiento.

Los lodos secundarios se producen en los reactores biológicos y se sedimentan o separan del agua en los sedimentadores secundarios. Estos sedimentadores tienen en su base una tolva para almacenar y concentrar los lodos sedimentados. La extracción del lodo sedimentado se efectúa por carga hidráulica y por el accionamiento mecánico de las rastras que "barren" el fondo del tanque, empujando los lodos sedimentados a la tolva para su extracción.

En la **Figura 2** se presenta el diagrama de flujo de una PTAR con tratamiento primario y secundario.

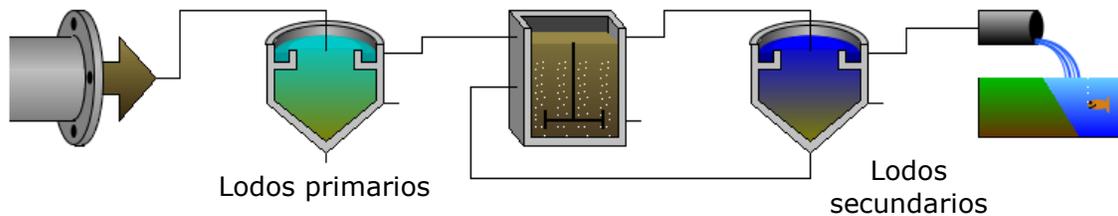


Figura 2 Diagrama de flujo de producción de lodos primarios y secundarios

3.2. Cantidad y características

Las características de los lodos dependen principalmente de su origen, su tiempo de retención en las etapas de la PTAR y el tipo de tratamiento que han recibido.

La composición química típica de los lodos producidos y tratados se presenta en la **Tabla 1** (Metcalf & Eddy, 2003).

Concepto	Unidades	Lodo primario	Lodo primario digerido	Lodo secundario
Concentración de sólidos	%	5-9	2-5	0.8-1.2
Sólidos volátiles	% de ST ¹	60-80	30-60	59-88
Proteína	% de ST	20-30	15-20	32-41
Nitrógeno (N)	% de ST	1.5-4	1.6-3	2.4-5
Fósforo (P ₂ O ₅)	% de ST	0.8-2.8	1.5-4	2.8-11
Óxido de potasio (K ₂ O)	% de ST	0-1	0-3	0.5-0.7
Celulosa	% de ST	8-15	8-15	-

¹ ST = Sólidos totales.

Concepto	Unidades	Lodo primario	Lodo primario digerido	Lodo secundario
Hierro	% de ST	2-4	3-8	-
Óxido de silicio (SiO ₂)	% de ST	15-20	10-20	-
pH	u. pH	5-8	6.5-7.5	6.5-8
Alcalinidad	mg CaCO ₃ /l	500-1,500	2,500-3,500	580-1,100
Ácidos orgánicos	mg HAc/l	200-2,000	100-600	1,100-1,700
Contenido energético	kJ ST/kg	23,000-29,000	9,000-14,000	19,000-23,000

Tabla 1 Composición física y química típica del lodo

La cantidad de lodo producido y sus características dependen también del tipo de proceso en el que éste es producido. Un lodo primario, por ejemplo, presenta mejores características de sedimentación que uno secundario, además que tendrá una mayor concentración de sólidos. En la **Tabla 2** (Metcalf & Eddy, 2003) se presentan las características y cantidades de lodo que se producen normalmente en diferentes procesos de tratamiento.

Proceso	Gravedad específica sólidos	Gravedad específica lodo	Producción de sólidos secos, kg/1000 m³
Sedimentación primaria	1.4	1.02	110-170
Lodos activados (purga)	1.25	1.005	70-100
Filtro biológico (purga)	1.45	1.025	60-100
Aireación extendida (purga)	1.30	1.015	80-120
Laguna aireada (purga)	1.30	1.01	80-120
Filtración	1.20	1.005	12-24
Remoción algal	1.20	1.005	12-24
Sedimentación primaria con adición de cal (350-500 mg/l)	1.9	1.04	240-400

Proceso	Gravedad específica sólidos	Gravedad específica lodo	Producción de sólidos secos, kg/1000 m³
Sedimentación primaria con adición de cal (800-1,600 mg/l)	2.2	1.05	600-1,300
Denitrificación con biomasa suspendida	1.20	1.005	12-30
Filtro biológico de desbaste	1.28	1.02	-

Tabla 2 Características y cantidades de lodo típicas

El volumen de lodo depende en su mayoría 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%² (Metcalf & Eddy, 2003).

3.3. Normatividad que deben satisfacer

Los lodos producidos en una planta de tratamiento deben cumplir con las siguientes Normas Oficiales Mexicanas:

- NOM-004-SEMARNAT-2002 (NOM-004)
- NOM-083-SEMARNAT-2003 (NOM-083)

Además, deberán contar con la "Constancia de no peligrosidad de los mismos", de acuerdo al trámite SEMARNAT 07-007.

NOM-004-SEMARNAT-2002

En la NOM-004-SEMARNAT-2002, Protección ambiental.- Lodos y biosólidos.- Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final, se especifican los siguientes criterios con los que deberán cumplir los biosólidos para ser aprovechados:

² Lodo secundario de proceso de lodos activados precedido de sedimentación primaria.

- Los biosólidos deben ser tratados para controlar la atracción de vectores. Se recomiendan varios procesos para lograr esto, como el reducir la masa de sólidos volátiles al menos en un 38% durante su tratamiento.
- Los biosólidos se clasifican en excelentes o buenos de acuerdo al contenido de metales pesados que se indica en la **Tabla 3** y en clase A, B o C de acuerdo a su contenido de patógenos y parásitos indicado en la **Tabla 4**.
- El aprovechamiento que se les podrá dar a los biosólidos depende de su clasificación, como se indica en la **Tabla 5**.

Contaminante (en forma total)	Excelentes, mg/kg base seca	Buenos, mg/kg base seca
Arsénico	41	75
Cadmio	39	85
Cromo	1,200	3,000
Cobre	1,500	4,300
Plomo	300	840
Mercurio	17	57
Níquel	420	420
Zinc	2,800	7,500

Tabla 3 Límites máximos permisibles para metales pesados en biosólidos de acuerdo a NOM-004

Clase	Bacterias	Patógenos	Parásitos
	Coliformes fecales, NMP/g base seca	<i>Salmonella spp</i> , NMP/g base seca	Huevos de helminto, huevos/g base seca
A	<1,000	<3	<1
B	<1,000	<3	<10
C	<2,000,000	<300	<35

Tabla 4 Límites máximos permisibles para patógenos y parásitos en biosólidos de acuerdo a NOM-004

Tipo	Clase	Aprovechamiento
Excelente	A	Usos urbanos con contacto público directo durante su aplicación Los establecidos para clase B y C
Excelente o bueno	B	Usos urbanos sin contacto público directo durante su aplicación Los establecidos para clase C
Excelente o bueno	C	Usos forestales Mejoramiento de suelos Usos agrícolas

Tabla 5 Aprovechamiento de biosólidos de acuerdo a su clasificación de acuerdo a NOM-004



Figura 3 Disposición de lodos en monorrelleno

NOM-083-SEMARNAT-2003

En la NOM-083-SEMARNAT-2003, Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial, se clasifican los sitios de disposición final de acuerdo a lo indicado en la **Tabla 6**.

Tipo	Toneladas por día recibidas
A	Mayor a 100
B	50 hasta 100
C	10 y menor a 50
D	Menor a 10

Tabla 6 Categorías de sitios de disposición final de acuerdo a NOM-083

En esta Norma se indican las siguientes características constructivas y operativas del sitio:

1. Debe contar con una barrera geológica natural o equivalente.
2. Debe garantizar la extracción, captación, conducción y control del biogás generado en el sitio.
3. Se debe construir un sistema de captación y extracción del lixiviado generado.
4. Debe contar con un drenaje pluvial.
5. Debe contar con área de emergencia para depositar los residuos en cualquier eventualidad, desastre natural o emergencia.
6. Debe alcanzar los niveles mínimos de compactación de la **Tabla 7**.
7. Se debe controlar la dispersión de materiales ligeros, fauna nociva e infiltración pluvial.
8. Se deben adoptar medidas para los residuos no admitidos. Los lodos deben ser previamente tratados o acondicionados antes de su disposición final.
9. El sitio debe contener obras complementarias como caminos, cerca perimetral, caseta de vigilancia, servicios básicos, franja de amortiguamiento.

10. Se debe contar con manual de operación, control de registro e informe mensual de actividades.
11. Se deben medir y controlar de impactos ambientales producidos.
12. La separación de residuos en el sitio no debe afectar el cumplimiento de estas especificaciones ni presentar riesgos para las personas.

Sitio	Compactación de residuos, kg/m³	Recepción de residuos sólidos, ton/d
A1	>700	>750
A2	>600	100-750
B	>500	50-100
C	>400	10-50

Tabla 7 Requerimientos de compactación del sitio de disposición final de acuerdo a NOM-083



Figura 4 Construcción de sitio de disposición de biosólidos

Para la clausura del sitio, la cobertura debe aislar los residuos, minimizar la infiltración de líquidos, controlar el flujo de biogás generado, minimizar la erosión y brindar un drenaje adecuado.

3.4. Problemática en el manejo y disposición de lodos

De acuerdo a su naturaleza, los lodos deben ser tratados antes de disponerse. Al manejarlos, se deben tener ciertas consideraciones debido a su contenido de sólidos. El contenido de sólidos debe ser utilizado en el diseño y dimensionamiento de las bombas, tuberías y equipos utilizados para su manejo y tratamiento.

Los lodos producidos en las plantas de tratamiento, principalmente los primarios, generalmente contienen basuras que no fueron removidas en las cribas del pretratamiento. Para remover estas basuras y evitar que dañen equipos, se requiere un pretratamiento, como puede ser una criba o molino.

Antes de poder aprovechar o disponer los lodos, éstos deben ser estabilizados para reducir la atracción de vectores, los olores y los riesgos a la salud. Además, los lodos deben ser desaguados para reducir su volumen.

Estabilización de lodos

La estabilización de lodos es un proceso que tiene las ventajas de reducir la masa y volumen de éstos, facilitar el desaguado y reducir los organismos patógenos, olores y atracción de vectores.

Los cuatro métodos más comunes para estabilizar los lodos son:

- Digestión anaerobia
- Digestión aerobia
- Composteo
- Adición de cal

No obstante las ventajas que trae la estabilización de lodos, estos procesos presentan varias dificultades, siendo la más importante, el costo de inversión y operación.

La digestión anaerobia es el proceso con mayores ventajas, sin embargo, su costo de construcción es más elevado, los digestores requieren una gran cantidad de equipos periféricos, requiere que los lodos sean calentados, el agua en el lodo contiene una elevada concentración de amoníaco y se desestabiliza si no se lleva un buen control de la operación.

La digestión aerobia se usa típicamente en plantas de tratamiento con capacidades menores a 220 l/s (Water Environment Federation, 2010). Este tipo de estabilización, aunque tiene un menor costo de construcción que la digestión anaerobia, presenta la desventaja de que el costo de operación es más elevado, ya que requiere suministro de aire para estabilizar los lodos.

El composteo se usa generalmente en los lodos que serán utilizados como mejoradores o acondicionadores de suelos. Este proceso requiere de mano de obra intensiva y puede generar olores. Además, puede incrementar la masa de biosólidos a disponer y transmitir los patógenos por medio del polvo que genera.

La estabilización alcalina con adición de cal presenta la ventaja de una inversión menos costosa y es más fácil de operar que los otros procesos. Sin embargo, este proceso tiene la gran desventaja de que los biosólidos producidos pueden regresar a su estado inestable si el pH cae después del tratamiento, lo que ocasiona el crecimiento de nuevos microorganismos. Otros problemas son los olores y el costo de la cal o material alcalino, que además incrementa la masa de los biosólidos a disponer.

Desaguado de lodos

El proceso de desaguado consiste en remover agua de los lodos para tener un material que pueda ser utilizado o dispuesto en algún sitio. En este proceso se tienen dos productos: una torta con características similares a un material sólido, y un sobrenadante con concentraciones elevadas de contaminantes.

Este proceso tiene grandes costos de inversión y de operación y mantenimiento ya que generalmente es necesario añadir polímero o algún material coagulante para lograr mejor aglutinación de las partículas y con ello incrementar la eficiencia del proceso.

El transporte de los lodos secos puede ser un problema en las plantas de tratamiento ya que debido a su contenido de sólidos, se requieren bandas transportadoras o transportes de tornillo. El diseño de estos equipos debe hacerse de acuerdo a la densidad, temperatura y contenido de humedad del lodo.

El manejo de la corriente de sobrenadante producido también es un problema, ya que ésta debe ser retornada al tren de tratamiento de agua para ser tratada. Esta corriente presenta altas concentraciones de sólidos (especialmente en el desaguado en centrífuga), y de nitrógeno y fósforo. Estas elevadas concentraciones pueden ocasionar problemas al proceso si no se cuenta con un tanque de homogenización y se retornan al tratamiento de forma dosificada.

Disposición de lodos

La disposición de los lodos es otro gran problema en las plantas de tratamiento ya que se requiere construir un monorrelleno o llevarlos a disponer a algún sitio autorizado para esto.

La construcción de un monorrelleno tiene el principal problema que requiere una gran superficie de terreno. La selección del terreno adecuado es una tarea difícil que satisfaga los requerimientos de la NOM-083. El terreno tiene un determinado tiempo de vida útil, después del cual se satura y se tiene que buscar otro sitio, ya que no siempre es factible ampliar el existente. Además, es necesario contar con los permisos ambientales correspondientes.

Un método utilizado para disponer de los lodos, es el "Dedicated land disposal". En este método, los lodos, al ser aplicados al sitio, son mezclados con la capa superficial de lodos o tierra, lo cual ayuda a secarlos. La ventaja de este método, es que se utilizan tasas de aplicación de biosólidos mucho más altas que con otros métodos, lo cual reduce el área requerida.

Por otro lado, la disposición en un relleno tiene el problema del transporte de biosólidos y el pago de derechos. La distancia entre la

PTAR y el relleno/monorrelleno en ocasiones es muy grande y puede ser a través de zonas urbanas.

Al contar con un monorrelleno en el sitio, se presenta también el problema del manejo y tratamiento de los lixiviados, los cuales se concentran en pocos meses del año.

Además del problema del sitio de disposición, en la PTAR se requiere contar con un contenedor para almacenar los lodos. Este almacenamiento puede presentar varios problemas de seguridad ya que, a elevadas temperaturas, pueden auto calentarse y empezar a quemarse. Incluso, en determinadas circunstancias, las partículas o polvos de sólidos secos pueden causar explosiones.



Figura 5 Sitio de disposición de lodos

4. OPORTUNIDADES DE APROVECHAMIENTO Y DISPOSICIÓN

La producción de lodos en una planta de tratamiento, puede traer también ciertos beneficios dependiendo del tratamiento o destino que se les dé. Las principales formas de aprovechamiento son como fuente de energía o mejoradores de suelo en la agricultura. En esta sección se describen estas dos formas, además de presentar algunas experiencias favorables en México.

4.1. Fuente de energía

Una forma de aprovechar los lodos producidos en una planta de tratamiento es por medio del biogás que se obtiene como subproducto en la digestión anaerobia de los lodos. La digestión anaerobia es un proceso de estabilización, en el cual se lleva a cabo la destrucción de la materia orgánica e inorgánica en ausencia de oxígeno.

En plantas de tratamiento de tamaño grande, se pueden obtener grandes beneficios derivados del aprovechamiento del biogás. Su uso como fuente de energía no es un concepto nuevo en la industria, y está ganando importancia debido a cambios en la economía por el incremento en el costo de la energía eléctrica. El biogás generado puede producir entre 50 y 100% de la energía requerida en un tratamiento biológico convencional.

Las tendencias actuales han ocasionado que este tipo de procesos sean cada vez más rentables. El mercado de la energía es muy volátil, el costo de la electricidad, gas natural y combustibles fósiles ha aumentado dramáticamente, favoreciendo el uso de fuentes renovables de energía. La tecnología se ha desarrollado, ofreciendo alternativas más eficientes y más económicas que hacen viable implementar dichos sistemas. La mejoría de los sistemas ha permitido la optimización de recursos, con esto, reduciendo los costos de operación. La sociedad demanda soluciones que causen un menor impacto en el medio ambiente. Este conjunto de factores hace que la utilización de biogás se deba considerar como parte integral del proceso en una planta de tratamiento de aguas residuales.

Se puede aprovechar el biogás en un sistema de cogeneración, que genera electricidad y energía térmica simultáneamente, logrando una eficiencia global mayor a la que se obtiene cuando se utilizan sistemas separados con el mismo propósito. Durante la cogeneración se utiliza el

biogás para alimentar un motor-generador para generar electricidad, el agua de enfriamiento que se descarga del motor, a una temperatura de 70 a 82 °C, y el gas de escape caliente del motor se pueden utilizar para calentamiento mediante un intercambiador de calor.

En la **Figura 6** (2G CENERGY, 2011) se muestra un sistema de cogeneración de energía eléctrica y térmica a partir del biogás producido en la digestión anaerobia.

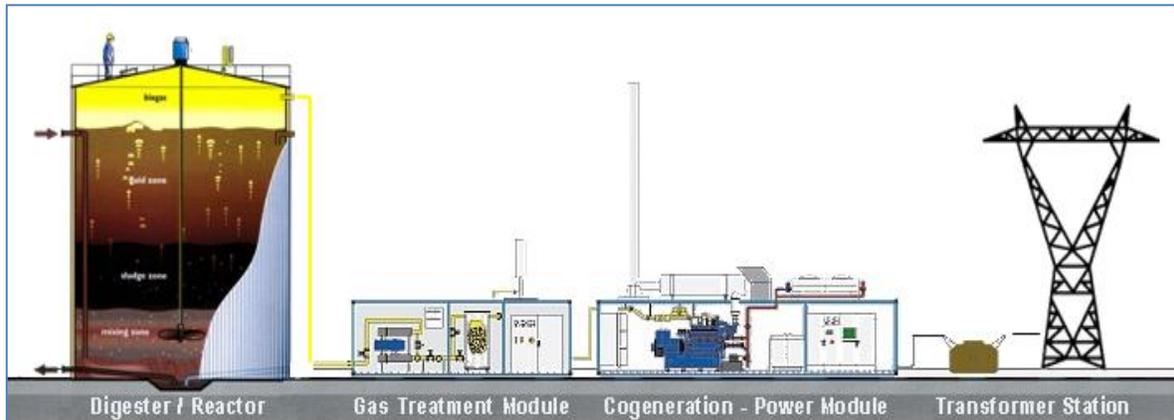


Figura 6 Aprovechamiento del biogás en un sistema de cogeneración

Producción y características del biogás

La producción de biogás es función de la destrucción de sólidos suspendidos volátiles en el digester. Ésta es entre 0.8 a 1.1 m³ de biogás por cada kilogramo de sólidos suspendidos volátiles destruidos (Water Environment Federation, 1998).

El biogás producto de la destrucción anaerobia de la materia orgánica tiene una gravedad específica de aproximadamente 0.86 en relación al aire (Metcalf & Eddy, 2003) y contiene entre 45 y 75% en volumen de metano y 25 a 45% de dióxido de carbono (Water Environment Federation, 1998). Otros componentes y características del biogás se indican a continuación:

- Nitrógeno 0.2 a 2.5%
- Amoníaco 100 a 2,000 ppb_v

- Sulfuro de hidrógeno (H_2S) 200 a 3,500 ppm_v
- Siloxanos 100 a 4,000 ppb_v
- Vapor de agua 5.9 a 15.3%

El poder calorífico del biogás varía dependiendo del contenido de metano, siendo el poder calorífico de éste de $35,800 \text{ kJ/m}^3$ (Metcalf & Eddy, 2003). Aunque el contenido de hidrógeno afecta el poder calorífico del biogás, el metano es el componente principal del combustible. El poder calorífico alto del biogás varía entre $18,600$ y $26,100 \text{ kJ/m}^3$, con un promedio de $23,800 \text{ kJ/m}^3$. Este poder calorífico corresponde al calor liberado durante la combustión, medido con calorímetro. Las eficiencias de los motores normalmente se basan en el poder calorífico inferior, que es el poder calorífico del gas cuando no se ha condensado el vapor de agua producido por la combustión. Como comparación, un biogás que contiene 70% de metano tiene un poder calorífico inferior de $23,800 \text{ kJ/m}^3$ y un poder calorífico alto de $26,200 \text{ kJ/m}^3$. La eficiencia global de conversión de la energía química del biogás en energía eléctrica producida es normalmente 38-39%.



Figura 7 Digestores anaerobios y esfera de almacenamiento de biogás

Cogeneración de energía eléctrica

Los componentes de un sistema de cogeneración incluyen el motor, el generador, la recuperación de calor y la interconexión eléctrica, integrados en un solo sistema. Aunque la energía mecánica del motor normalmente se utiliza para generar electricidad, también se puede utilizar para impulsar equipo rotatorio como compresores, bombas y sopladores. La energía térmica del proceso se puede utilizar en aplicaciones directas en proceso o indirectas para producir vapor, agua caliente, aire caliente para secado o agua fría para enfriamiento de proceso.

Los principales beneficios de la cogeneración son:

- Mayor eficiencia en la conversión y uso de energía.
- Menos emisiones al ambiente.
- El aprovechamiento de combustibles alternos disminuye costos, reduce la necesidad de disponer del residuo y proporciona competitividad económica.
- El empleo de formas de generación de electricidad descentralizadas con alta eficiencia evita pérdidas por transmisión y aumenta la flexibilidad en el uso del sistema.

El interés de utilizar sistemas de cogeneración en las plantas de tratamiento de aguas residuales ha crecido en los últimos años. Algunos de los factores que lo promueven son: tener energía de respaldo (proporcionan confianza durante cortes en el suministro de energía), la disponibilidad de combustible gratuito comparado con los altos costos del gas natural, el interés en el uso de fuentes renovables de energía y los incentivos que ofrece el gobierno (energías limpias).

Las tecnologías de cogeneración que actualmente se consideran para utilizar el biogás son los motores de combustión interna, las microturbinas, las turbinas de gas, las celdas de combustible y los motores Stirling.

Los motores de combustión interna son la tecnología más comúnmente usada en las plantas de tratamiento de aguas residuales. Estos motores ofrecen la ventaja de su baja emisión de óxidos de nitrógeno que puede

cumplir con las regulaciones de emisiones a la atmósfera. Normalmente se utilizan en tamaños de 250 a 2,500 kW.

El factor de eficiencia de transformación a electricidad es del 25 al 40%. Si los intercambiadores de calor son del tamaño correcto, se pueden recuperar hasta 7,400 kJ/h de calor por cada kW alimentado al generador, lo que aumenta la eficiencia del 40 al 45%. La eficiencia global del sistema, que incluye recuperación de calor del aceite lubricante, cubierta del motor, agua y gas, puede ser del 70 al 80%.

La principal dificultad que se presenta al aprovechar el biogás es que puede requerir un extenso pretratamiento previo a su aprovechamiento para evitar daños al equipo. El nivel de tratamiento requerido es variable, depende de las necesidades de la tecnología de cogeneración utilizada. Se deben eliminar siloxanos, sulfuro de hidrógeno, contenido de humedad y elementos traza.

4.2. Aprovechamiento en la agricultura

Un ejemplo benéfico de los diversos usos de los biosólidos es la incorporación al terreno para abastecerlo de nutrientes y para renovar la materia orgánica del terreno. Los biosólidos se pueden utilizar en terrenos agrícolas, bosques, campos de pastoreo, o en terrenos alterados que necesitan recuperación.

El reciclaje de los biosólidos a través de la aplicación al terreno tiene varios propósitos. Éstos mejoran las características del suelo, tales como la textura y la capacidad de absorción de agua, las cuales brindan condiciones más favorables para el crecimiento de las raíces e incrementan la tolerancia de la vegetación a la sequía. También provee nutrientes esenciales para el crecimiento vegetal, incluyendo el nitrógeno y el fósforo, así como algunos micronutrientes esenciales, tales como el níquel, el zinc y el cobre. Los biosólidos pueden servir también como una alternativa o sustituto al menos parcial de los costosos fertilizantes químicos.

Los nutrientes contenidos en los biosólidos (orgánicos) ofrecen diversas ventajas en comparación con los fertilizantes inorgánicos gracias a que pueden ser incorporados lentamente por las plantas en crecimiento. Estas formas orgánicas de nutrientes son menos solubles en agua y,

por lo tanto, tienen una menor probabilidad de lixiviarse al agua subterránea o ser arrastradas a las aguas superficiales.

Una de las propiedades más importantes de los biosólidos que incide en la fertilidad de los suelos es el sinergismo, el cual se manifiesta al aplicarse junto con los fertilizantes. Sinergismo es la acción combinada de varias sustancias químicas las cuales producen un efecto total más grande que el efecto de cada sustancia por separado. Esta propiedad da por resultado la reducción entre el 15 y el 50% de fertilizante aplicado y se obtiene la misma producción que aplicando sólo fertilizante, (Crespo, González, Miramontes, & Nuño, 2007).

Existen diversos métodos para la aplicación de biosólidos al terreno. La selección del método depende del tipo de terreno y de la consistencia de los biosólidos.

Los biosólidos líquidos contienen del 94 al 97% de agua y cantidades de sólidos relativamente bajas (del 3 al 6%). Éstos se pueden inyectar al suelo, con vehículos especializados para esto; o pueden ser aplicados a la superficie del terreno con equipos agrícolas convencionales.



Figura 8 Boleadora aplicando biosólidos

Con los biosólidos en la agricultura las necesidades de espacio en la planta de tratamiento pueden ser relativamente menores dependiendo del método de estabilización seleccionado.

Aun cuando la aplicación al terreno requiere un capital relativamente menor, se puede necesitar un extenso esfuerzo laboral, por lo que la supervisión es esencial para el éxito del programa.

Otra desventaja de la aplicación al terreno es la posible oposición pública, la cual se desarrolla principalmente cuando el sitio de uso se ubica cerca de las áreas residenciales. Sin embargo, muchos programas exitosos han ganado el apoyo público a través de una comunicación efectiva.

En general, es preferible el uso de un programa de aplicación de biosólidos al terreno manejado adecuadamente, al uso de fertilizantes convencionales.

Criterios de diseño

Los biosólidos, las áreas, y las características vegetativas son los factores de diseño más importantes a considerar en la aplicación de los biosólidos a la agricultura.

Los biosólidos deben satisfacer los requisitos normativos referentes a la estabilización y el contenido de metales. Además, el contenido de nutrientes y las características físicas, tales como el porcentaje de sólidos, son utilizados para determinar las tasas adecuadas de aplicación para la cosecha que va a ser cultivada y el suelo en el cual será cultivada.

Lo adecuado del terreno es determinado con base en factores tales como características del suelo, la pendiente, áreas habitacionales cercanas, la profundidad del agua subterránea, y la proximidad al agua superficial. Además, existen requisitos para el terreno con el fin proteger aún más la calidad del agua. Algunos ejemplos incluyen:

- El terreno debe ser suficiente para proporcionar áreas sin aplicación alrededor de los cuerpos de agua superficial, de pozos, y de humedales.

- Una profundidad mínima de un metro de la superficie del terreno al agua subterránea.
- Un pH del suelo en el rango de 5.5 a 7.5 para reducir al mínimo el lixiviado de metales y para favorecer al máximo las condiciones de crecimiento de las cosechas.

Lo adecuado del terreno también está influenciado por las características de las áreas circundantes.

El tipo de vegetación que se cultiva (gramínea o leguminosa) es también una consideración de diseño ya que afecta las opciones del equipo de aplicación, la cantidad de biosólidos que se aplican, y el periodo de aplicación. La cantidad de biosólidos que podrían ser aplicados a un terreno es una función de la cantidad de nutrientes requeridos por la vegetación y de la cantidad de metales encontrados en los biosólidos.

La aplicación al terreno está también limitada a ciertas épocas del año, especialmente en los climas más fríos. En nuestro país la aplicación de biosólidos en la agricultura está más relacionada con las temporadas de siembra de los diferentes cultivos. Por lo tanto, es necesario proporcionar una capacidad de almacenamiento junto con programas de aplicación al terreno. Incluso cuando se logra una sincronización adecuada (por ejemplo, antes de la siembra), el estado del tiempo puede interferir con la aplicación. Las lluvias de primavera-verano pueden hacer imposible que el equipo de aplicación llegue a los campos agrícolas, haciendo necesario el almacenaje de los biosólidos hasta que mejoren las condiciones climatológicas. La condición ideal para la aplicación de los biosólidos es que estos sean acarreados y lo más pronto posible aplicados al suelo, lo cual además debe ser también cercano a la fecha de siembra.

Los terrenos de pastoreo y las praderas también son más adaptables a las aplicaciones durante diversas estaciones.

La **Tabla 8** resume la frecuencia de aplicación, los periodos de aplicación, y las tasas de aplicación para diversos tipos de áreas.

Tipo de vegetación en terreno agrícola	Periodo	Frecuencia de aplicación	Tasa de aplicación
Maíz	Abril, Mayo, luego de la cosecha	Anualmente	12 a 25 toneladas secas/ ha
Granos pequeños	Marzo a Junio, Agosto y en el otoño	Hasta 3 veces por año	5 a 12 toneladas secas/ ha
Semillas de soya	Abril a Junio y en el otoño	Anualmente	12 a 49 toneladas secas/ ha
Heno	Después de cada poda	Hasta tres veces por año	5 a 12 toneladas secas/ ha
Áreas de bosques	Todo el año	Una vez cada 2 a 5 años	12 a 247 toneladas secas/ ha
Terreno de pastoreo	Todo el año	Una vez cada 1 a 2 años	5 a 148 toneladas secas/ ha
Áreas de recuperación	Todo el año	Una vez	148 a 247 toneladas secas/ ha

Tabla 8 Escenario típicos de la aplicación de biosólidos (Environmental Protection Agency , 2000)

Restricción de cultivos cuando se incorporan biosólidos

De acuerdo con la legislación, en los terrenos que reciben biosólidos, se debe esperar cierto tiempo antes de sembrar o cosechar un cultivo. En la **Tabla 9** se mencionan los tiempos de espera entre la aplicación y la cosecha de acuerdo con la Norma de los EUA.

Cultivo	Restricción
Algodón, trigo, sorgo y avena forrajera	Sin restricción ya que sus partes útiles nunca tocan el suelo. Además, aplicando los biosólidos antes de la siembra, se rebasan los 30 días para realizar la cosecha.
Alfalfa	Se pueden utilizar biosólidos antes del establecimiento, ya que es cuando este cultivo requiere de nitrógeno
Frutos con partes comestibles en contacto con la mezcla suelo biosólido	Cosechar después de 14 meses de aplicados los biosólidos
Fruto con partes comestibles subterráneas	Si la incorporación se realiza a los 4 meses o más después de la aplicación de los biosólidos. Cosechar después de 20 meses de la aplicación. Si la incorporación se realiza antes de 4 meses después de la aplicación de los biosólidos. Cosechar después de 38 meses de la aplicación.
Cultivos comestibles, forrajes, fibras	Cosechar después de 30 días de aplicados los biosólidos
Pastos para forraje	Pastar ganado después de 30 días de aplicados los biosólidos
Sitios con alto potencial de acceso público (parques)	Restringir el acceso por un año después de aplicados los biosólidos
Sitios con bajo potencial de acceso público (tierras de cultivo)	Restringir el acceso por 30 días después de aplicados los biosólidos

Tabla 9 Restricciones al uso de biosólidos, de acuerdo a la Norma de los EUA (EPA, 1993). (Salazar, Fortis, Vázquez, & Vázquez, 2003)



Figura 9 Cultivo experimental a los 3 meses de siembra con aplicación de biosólidos en Jamay, Jalisco

4.3. Experiencias favorables en México

En México, la mayoría de las plantas de tratamiento existentes se construyeron con digestión aerobia como proceso de estabilización de los lodos. Sin embargo, últimamente, se han cambiado el proceso de digestión a anaerobio.

Ambos procesos de digestión presentan diferentes ventajas y desventajas, y la selección del proceso de varios factores, entre ellos, el tamaño de la PTAR. En la **Tabla 10** se presentan las principales ventajas y desventajas de estos procesos.

Proceso	Ventajas	Desventajas
Digestión anaerobia	<ul style="list-style-type: none"> • Buena destrucción de SSV, 40–60% • Los costos de operación disminuyen si el gas metano que se genera se utiliza • Los biosólidos son adecuados para utilizarse en la agricultura • Buena inactivación de patógenos • Reduce la masa total de lodos • Bajos requerimientos netos de energía 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere operadores altamente capacitados • Lenta recuperación del proceso cuando se desestabiliza • El sobrenadante tiene alta carga de DBO, DQO, SST y N amoniacal • La limpieza del reactor es complicada • Potencial de emisión de olor • Altos costos de inversión inicial • Riesgos de seguridad relativos al manejo del biogás (inflamable)
Digestión aerobia	<ul style="list-style-type: none"> • Menores costos de inversión inicial • Sobrenadante menos agresivo que el anaeróbico • Simplicidad operativa • Adecuadamente diseñado, no emite olores desagradables • Reduce la masa total de lodo 	<ul style="list-style-type: none"> • Altos costos de operación por consumo de energía eléctrica • Generalmente menor reducción de SSV que el reactor anaerobio • Disminución del pH y alcalinidad • Potencial de dispersión de patógenos a través de los aerosoles • Los lodos digeridos usualmente son más complicados de desaguar • No genera biogás con potencial de generación de energía

Tabla 10 Ventajas y desventajas de la digestión aerobia y anaerobia (Water Environment Federation, 2010) (Metcalf & Eddy, 2003)

Algunas de las plantas en México, que se han construido, o están en etapa de construcción, con digestión anaerobia y aprovechamiento del biogás para generación de energía eléctrica son:

- PTAR Atotonilco, Atotonilco de Tula, Hidalgo
- PTAR Agua Prieta, Zona Conurbada de Guadalajara, Jalisco
- PTAR El Ahogado, Zona Conurbada de Guadalajara, Jalisco
- PTAR San Pedro Mártir I, Zona Conurbada de Querétaro, Querétaro

Todas estas plantas cuentan con un tren de tratamiento de agua compuesto por tratamiento primario y secundario. En cuanto al tren de lodos, éste consta de espesado, digestión anaerobia y desaguado. La digestión anaerobia les permite producir biogás, con el cual, generan energía eléctrica para satisfacer parte de la demanda de la PTAR y, energía calorífica para calentar el digestor hasta su temperatura de operación. En la **Tabla 11** se presentan las principales características de estas cuatro plantas de tratamiento.

Concepto	PTAR Atotonilco	PTAR Agua Prieta	PTAR El Ahogado	PTAR San Pedro Mártir I
Caudal	TPC: 23,000 l/s TPQ: 12,000 l/s	8,500 l/s	2,250 l/s	750 l/s
Calidad efluente	TPC: SST: 40 mg/l, DBO: 30 mg/l, C.F.: 1,000 NMP/100 ml TPQ: SST: 45 mg/l, C.F.: 1,000 NMP/100 ml	SST: 75 mg/l, DBO: 75 mg/l	SST: 40 mg/l, DBO: 30 mg/l, N: 15 mg/l, P: 5 mg/l, C.F.: 1,000 NMP/100 ml	SST: 30 mg/l, DBO: 30 mg/l, C.F.: 1,000 NMP/100 ml
Tren de tratamiento de agua	TPC: Sedimentador primario con lamelas, reactor de lodos activados convencional, sedimentador secundario, desinfección con cloro TPQ: Sedimentador primario avanzado, filtración, cloración	Unidades de filtración, reactor de lodos activados convencional, sedimentador secundario	Sedimentador primario, reactor de lodos activados con remoción de N y P, sedimentador secundario, desinfección UV	Sedimentador primario, reactor de lodos activados convencional, sedimentador secundario, desinfección UV
Tren de tratamiento de lodos	Espesado, digestión anaerobia mesofílica, desaguado	Espesado, digestión anaerobia, desaguado	Espesado, digestión anaerobia, desaguado	Espesado, digestión anaeróbica, desaguado
Producción/consumo energía eléctrica ³	80%	≈100%	78%	69%

Tabla 11 Principales características de PTARs con aprovechamiento de lodos. TPC y TPQ: Tratamiento Proceso Convencional y Químico, respectivamente

³ Datos de proyecto.

Algunas de estas PTARs están todavía en la etapa de construcción, sin embargo, se espera generen grandes beneficios una vez que estén operando a su capacidad.

Estos beneficios se darán, gracias a los lodos que ahí mismo se generan, los cuales, una vez estabilizados, podrán también ser aprovechados en la agricultura, incrementando aún más los beneficios a la sociedad.

En la **Figura 10** se muestra la PTAR El Ahogado, la cual se encuentra operando casi al 100% de su capacidad.



Figura 10 PTAR El Ahogado (Gobierno de Jalisco, 2012)

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los lodos generados en las plantas de tratamiento presentan varios problemas debido a su naturaleza y al tratamiento que requieren antes de poder disponerlos.

Aunque el tratamiento de los lodos es costoso, si éste es el adecuado, se pueden obtener varios beneficios tanto económicos como para la población en general.

Al tratar los lodos en un digestor anaeróbico, se produce biogás que a su vez se puede utilizar para generación de energía eléctrica y calorífica. La energía calorífica se utiliza para calentar el digestor mientras que la eléctrica se usa para cubrir parcial o totalmente las necesidades de la PTAR.

Además de este beneficio, los lodos digeridos pueden ser utilizados en la agricultura como mejoradores de suelo y/o para sustituir los fertilizantes químicos. Los biosólidos proporcionan los nutrientes que requieren las plantas para su crecimiento además que mejoran las características del suelo como su capacidad de absorción de agua.

En México, se han tenido varias experiencias exitosas con el aprovechamiento de los lodos, sin embargo, aún hace falta avanzar más en este terreno para sacar todos los beneficios posibles.

Para lograr estos objetivos, se recomienda iniciar con el aprovechamiento de lodos también en plantas medianas, con capacidades desde los 200 l/s hasta 1,000 l/s.

Adicionalmente los biosólidos (lodos estabilizados) pueden ser usados para acelerar la restauración ecológica de terrenos afectados por incendios forestales y para rellenar huecos formados por bancos de materiales, acelerando su restauración paisajística y permitiendo su uso posterior.

6. REFERENCIAS

2G CENERGY. (2011). *2G CENERGY Advanced Clean Energy Technologies*. Recuperado el 7 de Octubre de 2011, de <http://www.2g-cenergy.com/biogas.html>

Comisión Nacional del Agua. (2011). *Agenda del Agua 2030*. México, D.F.: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Comisión Nacional del Agua. (5 de Junio de 2013). *Comisión Nacional del Agua*. Recuperado el 3 de Julio de 2013, de La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Atotonilco beneficiará a más de 700 mil personas de la región: <http://www.conagua.gob.mx/FotoGaleria.aspx?n1=2614&n2=Imagen>

Comisión Nacional del Agua. (2011). *Inventario nacional de plantas municipales de potabilización y de tratamiento de aguas residuales en operación Diciembre 2011*. México, D.F.: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Comisión Nacional del Agua. (2012). *Situación del Subsector Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento Edición 2012*. México, D.F.: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Crespo, M. R., González, D. R., Miramontes, E. A., & Nuño, R. (2007). *Sinergismo fertilizante-composta de residuos sólidos municipales en el cultivo de maíz*. Obtenido de Avances en la investigación científica en el CUCBA: <http://www.cucba.udg.mx/anterior/publicaciones1/avances/avances2007.pdf>

Environmental Protection Agency . (2000). *Folleto Informativo de Tecnología de Biosólidos. Aplicación de Biosólidos al Terreno*. Obtenido de http://water.epa.gov/scitech/wastetech/upload/2003_07_30_mtb_cs-00-064.pdf

Gobierno de Jalisco. (2012). *El Ahogado*. Naucalpan, Estado de México, México: Litoprocess.

Gobierno del Estado de Jalisco. (6 de Abril de 2013). *Gobierno del Estado de Jalisco*. Recuperado el 3 de Julio de 2013, de Supervisa

Gobernador de Jalisco avance de PTAR de Agua Prieta:
<http://www.jalisco.gob.mx/es/prensa/noticias/4937>

Metcalf & Eddy. (2003). *Wastewater Engineering Treatment and Reuse* (4 ed.). Nueva York, Nueva York, Estados Unidos: McGraw-Hill.

Salazar, E., Fortis, M., Vázquez, A., & Vázquez, C. (2003). *Abonos Orgánicos y Plasticultura*. Recuperado el 2013, de Sociedad Mexicana de las Ciencias del Suelo A.C. Facultad de Agricultura y Zootecnia de la UJED.: http://www.smcs.org.mx/pdf/libros/abonos_org.pdf

Water Environment Federation. (1998). *Design of Municipal Wastewater Treatment Plants* (4 ed.). Alexandria, VA, USA: Water Environment Federation.

Water Environment Federation. (2010). *Design of Municipal Wastewater Treatment Plants* (5 ed.). Alexandria, Virginia, Estados Unidos: wefpress.

7. BIBLIOGRAFÍA

2G CENERGY. (2011). *2G CENERGY Advanced Clean Energy Technologies*. Recuperado el 7 de Octubre de 2011, de <http://www.2g-cenergy.com/biogas.html>

Comisión Nacional del Agua. (2011). *Agenda del Agua 2030*. México, D.F.: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Comisión Nacional del Agua. (5 de Junio de 2013). *Comisión Nacional del Agua*. Recuperado el 3 de Julio de 2013, de La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Atotonilco beneficiará a más de 700 mil personas de la región: <http://www.conagua.gob.mx/FotoGaleria.aspx?n1=2614&n2=Imagen>

Comisión Nacional del Agua. (2011). *Inventario nacional de plantas municipales de potabilización y de tratamiento de aguas residuales en operación Diciembre 2011*. México, D.F.: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Comisión Nacional del Agua. (2012). *Situación del Subsector Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento Edición 2012*. México, D.F.: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Crespo, M. R., González, D. R., Miramontes, E. A., & Nuño, R. (2007). *Sinergismo fertilizante-composta de residuos sólidos municipales en el cultivo de maíz*. Obtenido de Avances en la investigación científica en el CUCBA: <http://www.cucba.udg.mx/anterior/publicaciones1/avances/avances2007.pdf>

Diario Oficial de la Federación (2003). *NORMA Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002, Protección ambiental.- Lodos y biosólidos.- Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final*. México, D.F., Diario Oficial.

Diario Oficial de la Federación (2004). *NORMA Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003, Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial*. México, D.F., Diario Oficial.

Environmental Protection Agency . (2000). *Folleto Informativo de Tecnología de Biosólidos. Aplicación de Biosólidos al Terreno*. Obtenido de http://water.epa.gov/scitech/wastetech/upload/2003_07_30_mtb_cs-00-064.pdf

Gobierno de Jalisco. (2012). *El Ahogado*. Naucalpan, Estado de México, México: Litoprocess.

Gobierno del Estado de Jalisco. (6 de Abril de 2013). *Gobierno del Estado de Jalisco*. Recuperado el 3 de Julio de 2013, de Supervisa Gobernador de Jalisco avance de PTAR de Agua Prieta: <http://www.jalisco.gob.mx/es/prensa/noticias/4937>

Metcalf & Eddy. (2003). *Wastewater Engineering Treatment and Reuse* (4 ed.). Nueva York, Nueva York, Estados Unidos: McGraw-Hill.

Salazar, E., Fortis, M., Vázquez, A., & Vázquez, C. (2003). *Abonos Orgánicos y Plasticultura*. Recuperado el 2013, de Sociedad Mexicana de las Ciencias del Suelo A.C. Facultad de Agricultura y Zootecnia de la UJED.: http://www.smcs.org.mx/pdf/libros/abonos_org.pdf

Water Environment Federation. (1998). *Design of Municipal Wastewater Treatment Plants* (4 ed.). Alexandria, VA, USA: Water Environment Federation.

Water Environment Federation. (2010). *Design of Municipal Wastewater Treatment Plants* (5 ed.). Alexandria, Virginia, Estados Unidos: wefpress.

8. AGRADECIMIENTOS

A mi familia por apoyarme en estos proyectos, al equipo de la empresa por abordar juntos estos retos y a los clientes por invitarnos a participar en los mismos.

9. CURRÍCULUM VITAE DEL CANDIDATO

Nombre

Juan Gualberto Limón Macías

Estudios profesionales

Licenciatura en Ingeniería Química, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente, A.C., Tlaquepaque, Jalisco, México, 1975. Número de cédula profesional: 566894.

Doctorado en Ingeniería Civil, Área Ingeniería Ambiental, Universidad de Strathclyde, Glasgow, Escocia 1979

Distinciones

Premio Anual Juan I. Matute, otorgado por la Cámara Nacional de Comercio de Guadalajara, México, 1975.

Profesor Titular, otorgado por el Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente, A.C., México, 1983.

Premio Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, otorgado por la Federación Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales, A.C., México, 2006.

Experiencia profesional

Enero a junio de 1975: Miembro del equipo asesor en contaminación de aguas de la Cámara Regional de la Industria de la Curtiduría de Occidente.

1975 a 1979: Estudiante de posgrado en Glasgow, Escocia.

1979 a 1984: Jefe del Área de Limnología del Centro de Estudios Limnológicos de la SARH, a partir de abril de 1982 Jefe del mencionado centro.

1984 a 1986: Director Técnico del Grupo Hidrosanitec Ingeniería Ambiental.

1986 a 1992: En el Sistema Intermunicipal de los Servicios de Agua Potable y Alcantarillado de la Zona Metropolitana de Guadalajara. Fue hasta diciembre de 1989 Jefe del Departamento de Potabilización. Hasta noviembre de 1991 Gerente de Control de Calidad del Agua, y de noviembre de 1991 a 1992 Director General.

1989 a 1991: Secretario Ejecutivo del Consejo Estatal de Seguimiento y evaluación del acuerdo de Chapala.

1992 a 1996: Director Ejecutivo de la empresa Diseños Hidráulicos y Tecnología Ambiental.

1997 a 2001: Director Regional en Guadalajara de Montgomery Watson México.

Enero de 2002 al presente: Director General de la empresa AyMA Ingeniería y Consultoría, S.A. de C.V.

Principales proyectos

Como consultor de la entidad y en la revisión de propuestas en licitación de obras y servicios de tratamiento de aguas residuales y potabilización:

- PTAR Río Blanco, SIAPA, 1999-2000 y 2003.
- Planta Potabilizadora Toluquilla, SIAPA, 2002.
- PTAR EL Ahogado, CEA Jalisco, 2008.
- PTAR Agua Prieta, CEA Jalisco, 2008-2009.
- PTAR El Caracol, CONAGUA, 2011-2012.

Como director de proyecto en la elaboración de los proyectos ejecutivos de las siguientes plantas de tratamiento de aguas residuales y potabilizadoras:

- PTAR Miguel Alemán, COCEF, 2007.
- PTARs Acatic, Villa Hidalgo, Unión de San Antonio, Degollado, San Ignacio Cerro Gordo, San Miguel El Alto, El Grullo, Concepción de

Buenos Aires, Jalostotitlán y Zacoalco de Torres en Jalisco, CEA Jalisco, 2007-2008.

- PTAR Río Bravo y Nuevo Progreso, COCEF; 2008.
- Ampliación PTAR San Antonio de los Buenos, CESPT, 2011.
- Mejoramiento tren de lodos PTAR Chapala e Ixtlahuacán de los Membrillos, CEA Jalisco, 2011.
- PTAR Salamanca, Aqualia Infraestructuras, 2011.
- Planta Potabilizadora El Realito, Aqualia Infraestructuras, 2012.
- Rehabilitación PTAR Tizapán y PTAR La Barca, CEA Jalisco, 2012-2013.
- PTAR San Pedro Mártir II, CEA Querétaro, 2012-Presente.

Otros proyectos (como director de proyecto):

- Supervisión Técnica del Proyecto Ejecutivo de la PTAR El Ahogado y PTAR Agua Prieta, CEA Jalisco, 2009-2012.
- Supervisión del Precomisionamiento y Comisionamiento de las obras asociadas al Acueducto II, Querétaro, CIAQSA, 2009-2011.
- Auditoría Ambiental al Proyecto Hidroeléctrico La Yesca, CFE, 2009-Presente.