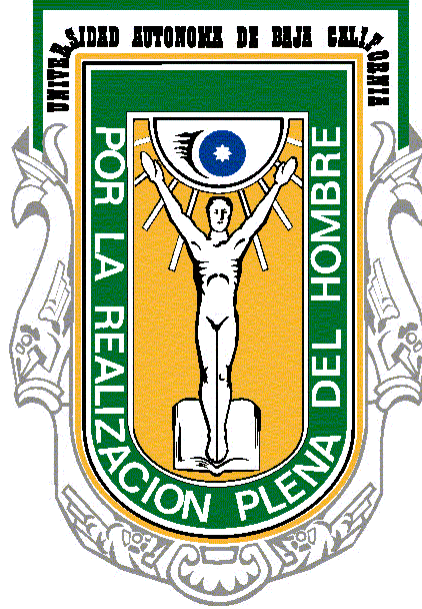


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
INSTITUTO DE INGENIERÍA

Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería



Estudio para la reducción, reutilización y disposición final de los lodos residuales de una planta de tratamiento de aguas residuales en Mexicali.

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

PRESENTA:

CARLOS SALAZAR BRIONES

DIRECTOR: Dr. JAIME ALONSO REYES LÓPEZ

CO-DIRECTOR: Dra. CONCEPCIÓN CARREÓN DIAZCONTI

Mexicali, B.C

Enero del 2013

*“Creavit Deus hominem ad imaginem et similitudinem
suam sapientiam”.*

..

Dedicatoria:

A Dios

A mi Familia

A ti

Agradecimientos:

A mi esposa Mireya Vázquez Cervantes,

Por su apoyo incondicional, su consejo y su amor en esta aventura, que es tanto mía como de ella

A mis Hijos, Carlos y Sofía,

Por ser mi inspiración, para buscar construir un mundo mejor para ellos.

A mis Padres, Raúl Enrique Salazar Pagaza, que desde el cielo comparte mis logros, a Carolina Briones Rojas, por su amor y entrega incondicional en cada paso de mi vida.

A mis Asesores, revisores y maestros,

Por su guía, apoyo y dedicación.

A mis amigos,

Marcelo, Eliana, Hugo, Francisco, Karla, que con su amistad han enriquecido mi experiencia y han hecho ameno el curso de esta maestría, y a mis demás amigos que fuera de este recinto me han hecho una mejor persona.

Al CONACYT,

Por la aportación de recursos, para la realización de este trabajo y su apoyo en mis estudios.

Y especialmente a:

Mi Director de tesis: Dr. Jaime Alonso Reyes López. Por ser un amigo, maestro y el guía de este proyecto

A mi Co-Director: Dra. Concepción Carreón D. Por compartir su experiencia y sus conocimientos, que sin duda serán parte de mi bagaje por siempre.

Al Dr. Jorge Ramírez por su amistad y enseñanzas.

A la Dra. Sara Ojeda. Por su tiempo, consejo y apoyo.

ÍNDICE

1. Introducción.....	6
1.1. Problemática.....	8
1.2. Justificación.....	8
1.3. Alcances del estudio.....	9
1.4. Objetivos.....	9
1.4.1. Objetivo General.....	9
1.4.2. Objetivos Particulares.....	9
1.5. Localización del sitio de estudio.....	10
1.6. Hipótesis.....	10
2. Antecedentes.....	11
2.1. Uso de Lodos Residuales.....	11
2.2. Planta termoeléctrica “la Rosita”.....	12
2.2.1. Planta de Tratamiento de aguas residuales (PTAR).....	14
2.2.2. Parámetros de control de calidad.....	16
2.2.3. Generación de lodos residuales.....	16
2.2.3.1. Proceso de digestión aerobia de los lodos.....	17
2.2.3.2. Espesamiento.....	17
2.2.3.3. Secado de lodos por filtración.....	18
2.2.3.4. Descarga de los lodos.....	18
2.2.4. Características generales de los lodos.....	19
3. Materiales y métodos.....	21
4. Marco referencial.....	26
4.1. Revisión de tecnologías para el reuso y tratamiento de lodos.....	26
4.2. Aplicación como mejorador de suelos y fertilizante agrícola.....	28
4.2.1. Experiencias en resultados y rendimientos.....	31
4.2.2. Legislación específica mexicana.....	33
4.2.3. Caso de EUA y Europa.....	37

4.3. Fuente de energía.....	40
4.3.1. Digestión anaerobia de lodos.....	41
4.3.2. Biocombustibles.....	42
4.3.3. Producción directa de electricidad mediante celdas microbianas.....	43
4.3.4. Incineración y recuperación de energía.....	45
4.3.5. Co-combustión.....	46
4.3.6. Pirólisis y gasificación.....	48
4.3.7. Materiales para construcción.....	50
4.3.8. Oxidación con agua en estado súper crítico (SCWO).....	51
4.3.9. Tratamiento hidrotérmico.....	54
4.3.10. Recuperación de fósforo.....	54
5. Resultados y discusiones.....	55
5.1. Análisis del uso Agrícola.....	56
5.1.1. Opciones de cultivo viables para el valle de Mexicali.....	58
5.1.2. Aplicación directa de lodos.....	62
5.1.3. Proceso de secado para compostaje.....	65
6. Conclusiones.....	71
7. Bibliografía.....	73
8. Anexos.....	81

ÍNDICE DE FIGURAS:

<i>Figura 1. Localización del área de estudio planta de tratamiento de aguas residuales La Rosita.</i>	10
<i>Figura 2. Proceso de generación de electricidad en una termoeléctrica de ciclo combinado</i>	12
<i>Figura 3. Central termoeléctrica de ciclo combinado "La Rosita"</i>	13
<i>Figura 4. Esquema del funcionamiento de la PTAR</i>	14
<i>Figura 5. Espesador de lodos.</i>	17
<i>Figura 6. Estabilización de lodos por aireación en espesador.</i>	17
<i>Figura 7. Contenedor de lodos.</i>	18
<i>Figura 8. Esquema de simulación para el proceso de secado usando el software trnsys 16.</i>	22
<i>Figura 9. Esquema de la interface type 56 utilizado para el modelaje de los materiales de construcción del secador.</i>	23
<i>Figura 10. Malla de muestreo en la ptar de La Rosita.</i>	25
<i>Figura 11. El principio de una célula de combustible microbiana (MFC, por sus siglas en ingles). El sustrato es metabolizado por las bacterias, que transfieren la ganancia de electrones hacia el ánodo. Modificada de Aelterman et al; 2006</i>	44
<i>Figura 12. Esquema de proceso en una planta de cemento portland. Modificada de Taruya et al; 2002.</i>	51
<i>Figura 13. Proceso de la scwo. Tomada de Svanstrom et al. 2005</i>	53
<i>Figura 14. Estadística principales cultivos en el Valle de Mexicali (SEFOA, 2009).</i>	60
<i>Figura 15. Esquema del reuso de lodos residuales.</i>	61
<i>Figura 16. Patios de la PTAR "La Rosita" y zona de muestreo.</i>	64
<i>Figura 17. Esquema del secador tipo invernadero.</i>	66
<i>Figura 18. Corrida del simulador con vidrio sencillo, donde se nota que la temperatura maxima se alcanza en el mes de julio.</i>	68
<i>Figura 19. Corrida del simulador con vidrio doble.</i>	69
<i>Figura 20. Corrida del simulador con vidrio triple.</i>	69
<i>Figura 21. Esquema de los Pasos para generar composta.</i>	70

ÍNDICE DE TABLAS:

TABLA 1 PRUEBAS DE CONTROL REALIZADAS EN LA PTAR.....	16
TABLA 2. COMPOSICIÓN QUÍMICA TÍPICA Y PROPIEDADES DEL LODO TRATADO/DIGERIDO. MODIFICADO DE FYTILI Y ZABANIOTOU 2006.	27
TABLA 3. RENDIMIENTO DE CULTIVOS DE MAÍZ Y TRIGO, EXPRESADA EN KG/HA. ADAPTADO DEL ESTUDIO DE LA INIA- LA PLATINA, 2001-2003. F: SE REFIERE AL TRATAMIENTO CON FERTILIZANTE MINERAL, L: SE REFIERE AL TRATAMIENTO CON LODOS.....	31
TABLA 4 LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE METALES PESADOS EN LODOS Y BIOSÓLIDOS PARA SU APROVECHAMIENTO. MODIFICADO DE LA NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-004- SEMARNAT-2002.	34
TABLA 5. CLASIFICACIÓN DE BIOSÓLIDOS EN FUNCIÓN DE SU CONTENIDO DE PATÓGENOS. MODIFICADO DE LA NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-004-SEMARNAT-2002	35
TABLA 6. APROVECHAMIENTO DE LOS BIOSÓLIDOS CON UN CONTENIDO DE HUMEDAD HASTA EL 85%. BASADO EN LA NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-004-SEMARNAT-2002.....	36
TABLA 7. VALORES MÁXIMOS PERMITIDOS EN CONTENIDO DE METALES PESADOS EN LODOS UTILIZADOS EN AGRICULTURA SEGÚN LA LEGISLACIÓN EUROPEA* (CONSEJO CE, 1986) Y LA ESTADOUNIDENSE (USEPA, 1993), Y CONCENTRACIONES EN LODOS DE LA PTAR (TERMOELÉCTRICA LA ROSITA, INFORME INTERNO, 2011).....	38
TABLA 8. APORTE MÁXIMO PERMITIDO DE METALES PESADOS POR HECTÁREA DE TERRENO CULTIVADO POR AÑO. VALORES CORRESPONDIENTES A LA NORMATIVA ESTADOUNIDENSE (USEPA. 1993) Y EUROPEA (CONSEJO CE, 1986).	39
TABLA 9. ANÁLISIS INMEDIATO, ANÁLISIS ELEMENTAL Y PODER CALORÍFICO DE LOS LODOS (SSL, SSV) Y EL CARBÓN (C) USADO EN ESTUDIOS DE COMBUSTIÓN. MODIFICADO DE OTERO ET AL. 2008.	47
TABLA 10. MONTO DE LA INVERSIÓN INICIAL DE ALGUNAS DE LAS OPCIONES SELECCIONADAS SEGÚN BIBLIOGRAFÍA REVISADA. LOS COSTOS ESTÁN INDICADOS EN USD.....	56
TABLA 11. PRINCIPALES PRODUCTOS AGRÍCOLAS EN EL VALLE DE MEXICALI, AÑO 2009 (SEFOA 2009).....	58
TABLA 12. COSTOS DE CULTIVO DE TRIGO POR HECTÁREA EN USD.	63
TABLA 13. PORCENTAJE DE HUMEDAD DE LOS LODOS DE LA ROSITA, METODOLOGÍA SEGÚN LA NOM-021-SEMARNAT-2000.	64
TABLA 14. RESULTADOS DEL PH DE LOS SUELOS EN LOS PUNTOS DE LA MALLA DE MUESTREO.....	65
TABLA 15. PROPIEDADES TÉRMICAS DE LOS MATERIALES PROPUESTOS PARA UN SECADOR TIPO INVERNADERO, EN MEXICALI B.C.....	67
TABLA 16. DESCRIPCION Y COSTO APROXIMADO DEL EQUIPO Y OPERACIÓN DIARIA EN USD.....	71

1. INTRODUCCIÓN

Debido a la creciente demanda de agua potable, impulsada por el aumento de la población en las ciudades y el consiguiente desarrollo en las actividades agrícolas,

industriales y comerciales, se ha promovido el reuso del agua residual previamente tratada. Así, el principal objetivo del tratamiento de aguas residuales es lograr cierto grado de purificación del agua mediante una combinación de operaciones que involucran una serie de procesos físicos, químicos y biológicos que tienen como fin eliminar los contaminantes y mejorar las características presentes en el agua residual para el fin que se requiera.

Los contaminantes contenidos en las aguas residuales son eliminados en plantas depuradoras donde son retenidos en los lodos que se generan durante el tratamiento. Así, se genera un subproducto con igual potencial de contaminación que requiere una disposición final controlada. En México se estima que la producción de lodos en las 140 ciudades mexicanas con más de 50,000 habitantes sería de aproximadamente 640,000 toneladas secas de lodo por año (AIDIS, 2003).

En el presente trabajo se realiza un estudio para establecer las alternativas más adecuadas para la reducción, reutilización y disposición final de los lodos residuales subproducto de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de La Central Eléctrica “La Rosita”.

Energía Azteca X, S de R.L de C.V es una filial de Intergen compañía de capital global, cuenta con 12 centrales eléctricas alrededor del mundo ubicadas en el Reino Unido, los Países Bajos, México, Filipinas y Australia. En México la compañía tiene la Central Termoeléctrica de Ciclo Combinado “La Rosita” ubicada en el municipio de Mexicali, Baja California.

Dicha planta genera electricidad con base en un proceso de ciclo combinado, el cual requiere grandes cantidades de agua que, además de ser utilizada como refrigerante, se utiliza como fluido de trabajo en las calderas para producir el vapor que moverá las turbinas y generará la electricidad. Debido al volumen de agua requerido, la empresa adquiere mediante convenio de compra parte del agua residual de la ciudad de Mexicali (aproximadamente 600 L/s) para sus procesos. Por este motivo la compañía cuenta con su propia planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR). En estas instalaciones se llevan a cabo los procesos de tratamiento primario y secundario, que tienen la finalidad de mejorar las características del agua residual. El tratamiento terciario se lleva a cabo en las plantas de poder de la central termoeléctrica. Durante el proceso de tratamiento de agua residual en las instalaciones de la PTAR se generan lodos residuales con un volumen aproximado de 14,000 toneladas por año (INTERGEN 2009).

El presente documento reporta los resultados del estudio para la reducción, reutilización y disposición final de los lodos residuales generados en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR)

1.1. Problemática

Durante el tratamiento de las aguas residuales se generan lodos que contienen contaminantes removidos de las aguas durante dicho tratamiento, tales como patógenos, metales pesados y tóxicos orgánicos. En México, según el Instituto Nacional de Ecología (INE, 2012) en la mayoría de los casos, estos residuos se disponen en corrientes de aguas superficiales, basureros a cielo abierto y/o rellenos sanitarios, lo que provoca la contaminación del aire, suelo y acuíferos.

En el caso de la PTAR “la Rosita” previo a su disposición final, al lodo resultante de este proceso se le determinan sus condiciones y características de corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad y biológico-infecciosas (análisis CRETIB), mediante la Norma Oficial Mexicana (NOM-052-SEMARNAT-1997), lo que permitirá establecer la clasificación del lodo y precisar si el lodo es considerado como un residuo peligroso o como un residuo no peligroso; lo que a su vez definirá el tipo de manejo que se empleará para los mismos.

Estos lodos representan un inconveniente para la empresa debido al volumen de producción y su costo de gestión. El manejo y disposición de los lodos residuales de la PTAR La Rosita, tiene actualmente un costo anual de alrededor de los cien mil USD, que representa un egreso elevado en la operación de la empresa. Los lodos son transportados a un relleno industrial privado, autorizado por el gobierno del estado para material clasificado como no peligroso. Deseando cambiar esta situación, se realizó un convenio entre la empresa Energía Azteca X, S de R.L. de C.V. y el Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC), con la finalidad de plantear un sistema tecnológico ambientalmente adecuado y económicamente viable enfocado hacia la reducción, reutilización y disposición final de sus lodos residuales.

1.2. Justificación

La posibilidad de disminuir los costos de disposición mediante la reducción y/o el reuso de los lodos, considerando un sistema tecnológico, económico y ambientalmente adecuado, justifica el estudio. El resultado del estudio establece un modelo a seguir para las demás plantas de tratamiento de aguas residuales, a fin de aprovechar el potencial de los biosólidos generados y establecer una relación más amigable con el medio ambiente. Para esto, es esencial encontrar tratamientos factibles, seguros y sostenibles para el reuso de lodos residuales.

Actualmente, en diversos países desarrollados se viene promoviendo el uso benéfico de los lodos a través de diversas alternativas, alcanzando en el caso de Europa hasta el 49 % de reutilización de los mismos (European Environment Agency, 2001).

1.3. Alcances del estudio.

El estudio tiene como alcance proponer un sistema tecnológico y ambientalmente adecuado, así como económicamente viable, para la reducción, reutilización y disposición final de los lodos residuales generados en la PTAR

Se proponen las alternativas, considerando las condiciones sociales, económicas y tecnológicas de la región. Las alternativas de solución se enfocaron a la protección ambiental por lo que se analizaron los lodos residuales, proponiendo un plan de manejo.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Con esta investigación se pretende identificar las alternativas para más adecuadas para el manejo, la reducción, reutilización y disposición final de los lodos residuales originados durante el proceso de generación de energía eléctrica en la Central La Rosita, en concordancia con sus características fisicoquímicas y con las condiciones (ambientales) prevalecientes en la región, económicamente viable y conforme a una práctica ambientalmente responsable.

1.4.2. Objetivos Particulares

- a) Determinar el potencial de reutilización de los lodos residuales.
- b) Determinar alternativas de reutilización de lodos residuales en una PTAR de acuerdo a las características de la región áridas y semiáridas.
- c) Proponer un plan de manejo que integre las alternativas de solución para la disposición final de lodos residuales, tomando en cuenta la seguridad y la viabilidad ambiental y económica de las propuestas.
- d) Plantear los proyectos para la reducción de lodos residuales. Tomando en cuenta la disponibilidad de infraestructura, recursos científicos y económicos.

1.5. Localización del sitio de estudio

El estudio se realizó en la Central Termoeléctrica La Rosita que se ubica en el lote No. 46 de la Colonia Progreso, 20 km al suroeste del Municipio de Mexicali, Baja California, 600 m al norte de la carretera federal No. 2 (**Fig. 1**). Las coordenadas geográficas de la planta de poder son $32^{\circ}36'08.5''$ latitud norte y $115^{\circ}37'39.5''$ longitud oeste.

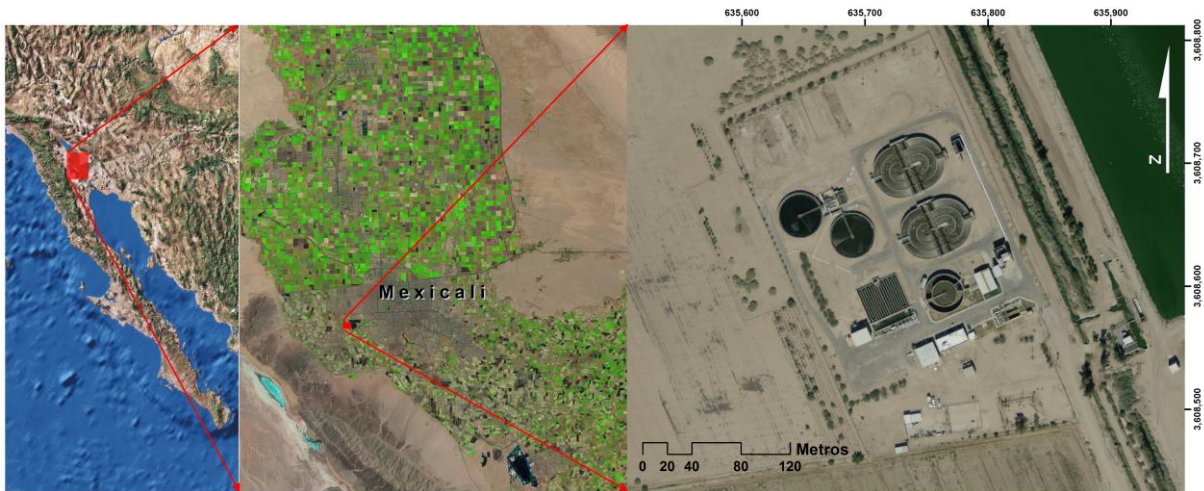


Figura 1. Localización del área de estudio Planta de Tratamiento de Aguas Residuales La Rosita.

1.6. Hipótesis.

Se pretenden utilizar los biosólidos generados en el proceso de depuración de agua residual en diferentes aplicaciones, donde se proteja al medio ambiente en un proceso de disposición final sustentable.

2. ANTECEDENTES

2.1. *Uso de Lodos Residuales*

El tratamiento y reuso del agua residual data de tiempos remotos; Según Arreguín (1999) vestigios de estos sistemas se pueden encontrar en la civilización Minoica, en la antigua Roma, o en las viejas granjas en Alemania e Inglaterra en los albores del siglo XIX. Otra muestra es el uso de alcantarillado para el desalojo de desechos en Londres, Boston y París. El reuso planeado de las aguas residuales inició en Estados Unidos aproximadamente en el año 1920, en la agricultura de los estados de Arizona y California. Algunos años después, también en Colorado y Florida se desarrollaron sistemas para el reuso urbano. La normatividad correspondiente se inició en California en la misma época. A partir de 1965, se impulsa de manera decisiva el reciclaje y el reuso de las aguas residuales. En Israel, se permite a partir de 1965 el uso de efluentes provenientes de tratamiento secundario para riego con excepción de los productos que se consumen crudos (Arreguín et al. 1999).

Un aspecto de gran preocupación es el efecto del uso de las aguas residuales en la salud. La Organización Mundial de la Salud publicó un reporte (OMS, 1973) en el que se establecen procedimientos para disminuir efectos en la salud. Los trabajos de investigación a nivel mundial, a este respecto, continuaron y los conocimientos en salud pública y epidemiología avanzaron. En 1985 se realizó una reunión de expertos en Engelbert, Suiza donde se actualizó y complementó el documento anterior, el cual se publicó en 1989 como el No. 778 de la OMS.

Los lodos son portadores de nutrientes que pueden estar contaminados con sustancias orgánicas, tales como hormonas, antibióticos, disruptores endocrinos y contaminantes orgánicos persistentes (POP's por sus siglas en ingles), e inorgánicos, como metales pesados (Adam et al.2007).

La problemática de los lodos residuales ha sobrellevado diferentes restricciones en cuanto a su reuso. Sin embargo, los tiempos cambian y están apareciendo nuevas vías para su aprovechamiento. Dadas estas premisas y en vista de que el reuso se ha vuelto un eje de desarrollo, es trascendental comenzar a cambiar el paradigma que se tiene del recurso y pensar en formas de reutilizarlo. En este sentido, los sectores industrial y agrícola ya han avanzado en algunos puntos, principalmente debido a que técnicamente es más simple idear soluciones conjuntas a gran escala y se ha pensado más que todo en el ahorro, y en las posibilidades de aprovechamiento.

Antes del año 2003 en Nueva Zelanda se generaban cerca de 77,000 ton/año de biosólidos secos. Actualmente la producción ha incrementado hasta llegar alrededor de 240,000 ton/año, como consecuencia del continuo aumento en el número de plantas de

tratamiento de aguas residuales. A la fecha el uso de tiraderos a cielo abierto es la práctica más común para la disposición de los biosólidos en Nueva Zelanda (Lundin 2004). En el caso de Israel, la producción de lodos es de 104,550 toneladas de materia seca anual, de las cuales el 35% es utilizada en la agricultura como fertilizante. En los casos de Francia el 28% e Italia el 32% y Estados Unidos dedica en su agricultura el 42% de los lodos producidos (Bigeriego 2011).

2.2. Planta termoeléctrica “la Rosita”.

En el año 2001, se aprueba la construcción de la Central Termoeléctrica de Ciclo Combinado “La Rosita” (Intergen), para producir 750 MW. La planta se ubica en la Colonia Progreso del municipio de Mexicali, 2.5 km al suroeste de Calexico. Gran parte de la electricidad generada por la termoeléctrica es enviada a surtir el mercado de California, EEUU y la otra parte se vende a Comisión Federal de Electricidad (CFE) para su consumo en México (Especialistas Ambientales, 2001).

Las plantas termoeléctricas de ciclo combinado funcionan inyectando el combustible (gas natural), mezclado con aire, a una turbina donde se produce la combustión. La turbina gira por la fuerza de expulsión de los gases y su giro se aprovecha para mover un generador y producir electricidad. El calor remanente de los gases que expelle la turbina se usa para generar vapor a través de un intercambiador de calor que se usa en un ciclo térmico convencional para mover otra turbina, la que a su vez produce electricidad al hacer girar otro generador (Figura 2).

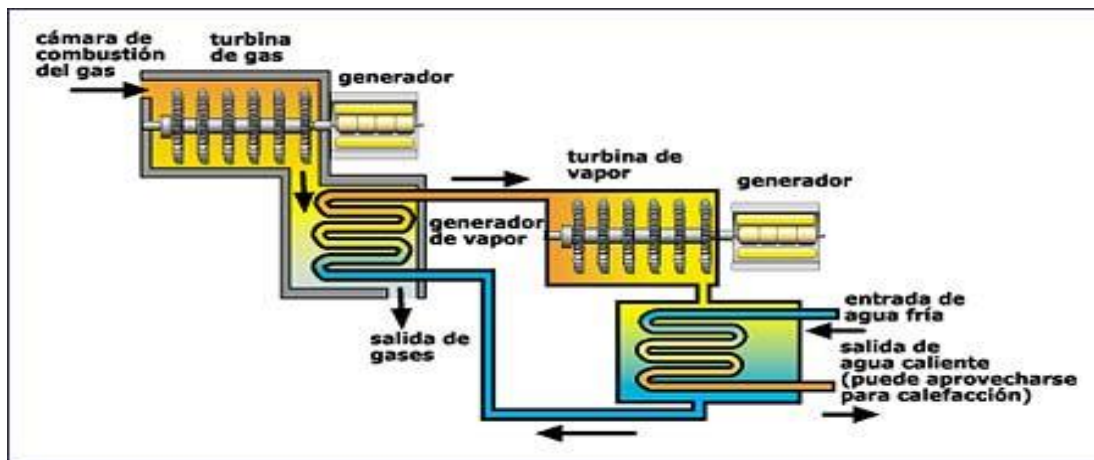


Figura 2. Proceso de generación de electricidad en una termoeléctrica de ciclo combinado

El agua se utiliza en grandes cantidades para la producción de vapor y para el enfriamiento de los equipos de producción de la planta. Es por esto que la empresa adquiere, mediante un convenio de compra el agua residual de la Ciudad de Mexicali, un volumen aproximado a los 600 L/s, los que son enviados por la Comisión Estatal de

Servicios Públicos de Mexicali (CESPM) a la Planta de Tratamiento de la Termoeléctrica (PTAR). El agua que ingresa al sistema de generación de vapor es enviada de la PTAR a las centrales de poder (Figura 3) para ser sometida a un tratamiento terciario para asegurar la calidad del vapor que se genera. El remanente es usado en el sistema de enfriamiento.



Figura 3. Central Termoeléctrica de Ciclo Combinado "La Rosita"

El proceso de los lodos activados para el tratamiento de aguas residuales consiste en el uso de microorganismos, para oxidar la materia orgánica presente en el agua de desecho y transformarla a una mezcla más estable, disminuyendo la carga orgánica contaminante. Para llevar a cabo lo anterior, los microorganismos requieren de un medio adecuado que les proporcione oxígeno y alimento, necesarios para su desarrollo. Bajo estas condiciones los microorganismos se multiplican rápidamente formando la llamada "biomasa", que oxida los diferentes tipos de materia orgánica presente en las aguas residuales y completan de esta forma el tratamiento biológico.

En una planta convencional de lodo activado, las aguas negras o de desecho pasan primero por un tanque de sedimentación primaria. Luego, se añade lodo activado (biomasa) al efluente del tanque, generalmente en la relación de 1 parte de lodo por 3 ó 4 partes de aguas negras decantadas, en volumen, y la mezcla pasa a un tanque de aireación. Ya en el tanque, el aire atmosférico se mezcla por agitación mecánica o se inyecta aire comprimido dentro del fluido mediante diversos dispositivos: generalmente se utilizan "difusores" pero también se usa placas filtrantes, tubos de filtro, eyectores y chorros.

Con cualquiera de los métodos, se pone a las aguas negras en íntimo contacto con los microorganismos contenidos en el lodo. En los primeros 15 a 45 minutos, el lodo absorbe los sólidos en suspensión y los coloides. Según se absorbe la materia orgánica, tiene lugar la "oxidación" biológica. Los organismos presentes en el lodo descomponen los compuestos de nitrógeno orgánico y destruyen los carbohidratos. El proceso avanza

rápido al principio y luego decae gradualmente en las próximas dos a cinco horas. Después continúa con un ritmo casi uniforme durante varias horas. En general el periodo de aireación dura de seis a ocho horas más.

Como derivado de este proceso de depuración de agua se obtienen entre 11,085 y 14,000 ton/año de lodo residual. Los puntos de descarga de lodo residual durante el proceso se indican en el diagrama de operación de la planta (Fig.4).

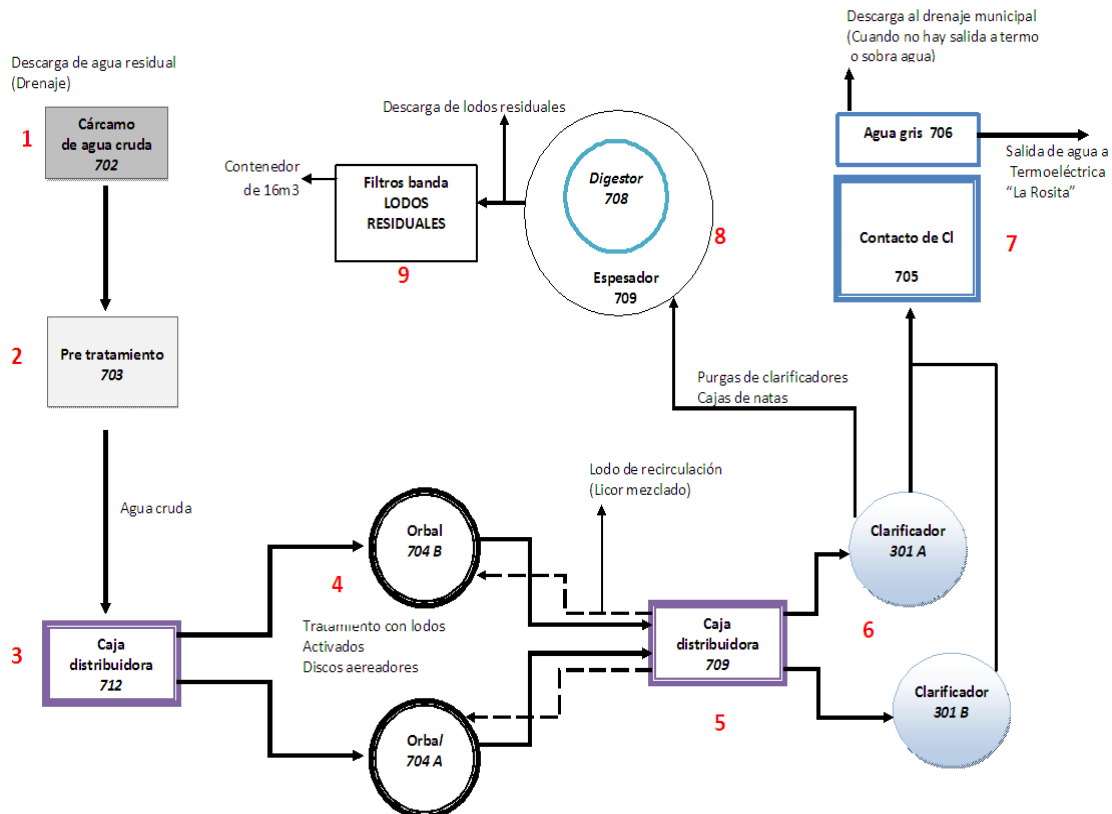


Figura 4. Esquema del Funcionamiento de la PTAR

2.2.1. Planta de Tratamiento de aguas residuales (PTAR).

El esquema que describe el funcionamiento de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de la empresa Energía Azteca X, S de R.L de C.V se muestra en la figura 4. Los números en rojo indican la ruta del proceso en orden consecutivo. Los números dentro de las figuras indican el código de las instalaciones tal como se conocen dentro de la planta.

Cárcamo de agua cruda 702. Tanque de concreto donde se recibe un caudal de alrededor de 600 l/s

Pre tratamiento 703. Cuenta con un sistema de rejillas que elimina partículas sólidas mayores de 10.5 mm.

Caja distribuidora 712. Reparte el agua cruda entre los orbales A y B. El agua que llega entra a manera de “cascada” aireando el contenido del tanque de manera que los residuos de menor densidad suben a la superficie y los restantes, del tamaño de arenas se sedimentan.

Orbal 704 A/B. Tanques donde se lleva a cabo el proceso de activación de lodos. El tanque es aireado por discos que giran en su interior proporcionando el oxígeno necesario para la degradación del contenido biológico del agua residual. Los lodos residuales generados en el tratamiento de agua se producen en parte en los tanques aireadores (orbales 704 A/B) y otra parte en los clarificadores.

Caja distribuidora 709. Distribuye el agua a los tanques clarificadores 301 A/B. Es donde también se lleva a cabo la recirculación de lodos de los clarificadores a los orbales.

Clarificador 301 A/B. Una rastra circula en el clarificador, funciona como un decantador secundario donde se sedimenta el fango producido.

Contacto con cloro 705/706. Un tanque con canales hace pasar el agua gris por hipoclorito de sodio para su desinfección.

Filtros banda para lodos residuales. Consiste en un conjunto de rodillos por los cuales se transportan las bandas filtrantes por donde se hace pasar el lodo para deshidratarlo.

2.2.2. *Parámetros de control de calidad.*

En el laboratorio de la PTAR se realizan seis muestreos diarios en diferentes partes del sistema, esto con el fin de cumplir con los parámetros de calidad definidos por los manuales de operación de la termoeléctrica. Estos parámetros de control se presentan en la tabla 1.

Tabla 1 Pruebas de control realizadas en la PTAR.

Pruebas	Técnica de análisis	Aplicación
Alcalinidad total	Método volumétrico	Agua de efluente Agua de influente
Cloro residual	DPD	Agua gris
DBO	Diferencial de presión	Agua gris Agua cruda
DQO	Reducción de cadmio (espectrofotómetro DR 2800)	Agua cruda Agua gris
Fósforo	Método aminoácido (espectrofotómetro DR 2800)	Efluente Influente
Nitratos	Reducción de cadmio (espectrofotómetro DR 2800)	Desinfección de agua gris
Nitritos RA, RB	Reducción de sulfato ferroso (espectrofotómetro DR 2800)	Agua cruda Agua gris
Nitrógeno amoniacal	PDP con espectrofotómetro DR 2800	Influente Efluente
PH	Sensor (sensor 3)	Agua influente Clarificadores Orbales Efluente
Turbidez	2100 P Turbidimeter	Influente Clarificadores Efluente
SST y SSV	Peso en gr.	Influente Efluente orbales Recirculaciones

2.2.3. *Generación de lodos residuales*

Los lodos residuales generados en el tratamiento de agua son producidos en parte en los tanques aireadores (orbales 704 A/B) y otra parte en los clarificadores. De ahí son enviados al biodigestor para ser espesados y digeridos. En esta parte del proceso es donde

se generan aproximadamente 40 toneladas diarias de lodos residuales que a su vez son pasadas por el filtro prensa, para ser deshidratados y posteriormente enviados a un contenedor. Finalmente estos lodos son remitidos a un sitio controlado de disposición final.

2.2.3.1. **Proceso de digestión aerobia de los lodos**

La misión del espesador (Fig. 5) es concentrar los lodos para hacerlos más densos reduciendo su volumen por evaporación y así facilitar su manejo en el filtro banda. El digestor estabiliza el fango por aireación (Fig. 6).



Figura 5. Espesador de lodos.



Figura 6. Estabilización de lodos por aireación en Espesador.

2.2.3.2. **Espesamiento**

Mediante el espesamiento de los lodos se consigue una reducción del volumen de entre un 30–80%, antes de cualquier otro tratamiento (como la deshidratación). En

plantas con alimentación regular de lodo, por lo general, el espesamiento tiene lugar directamente en el tanque de almacenamiento de los lodos.

El lodo es comprimido en la base del tanque mediante gravedad para después pasar a la etapa de deshidratación por medio de filtros banda. El tanque espesador se encuentra en la parte central del biodigestor, que tiene alrededor otro tanque digestor para estabilizar los lodos después del espesador. El tanque espesador está equipado con rodillos de rotación, que crea micro canales en el lodo para un mejor escurrimiento.

2.2.3.3. ***Secado de lodos por filtración***

El funcionamiento de los filtros banda se basa en un desplazamiento continuo sobre una tela horizontal apoyada en unas bandejas individuales, que pueden ser en acero inoxidable o materiales sintéticos. El deshidratado se realiza al comprimirse el lodo sobre unas parrillas reemplazables existentes en las bandejas.

2.2.3.4. ***Descarga de los lodos***

Los lodos que salen de los filtros banda se disponen en un contenedor (Fig. 7) para ser transportados y confinados. El contenedor de los lodos es retirado aproximadamente cada 2 o 3 horas, ininterrumpidamente, ya que la generación del residuo es constante durante todo el día.



Figura 7. Contenedor de lodos

2.2.4. Características generales de los lodos

Con el fin de tener un criterio sobre el tipo de lodos que se generan en la planta de tratamiento y a la vez determinar las posibilidades de manejo de estos residuos, se realiza periódicamente el muestreo y análisis de lodos conforme a las normas oficiales mexicanas NOM-004-SEMARNAT-2002 y NOM-052-SEMARNAT-2005

Los constituyentes principales de los lodos son compuestos orgánicos e inorgánicos y microorganismos. Dentro de los compuestos orgánicos se encuentran elementos como el carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, y componentes como grasas, aminoácidos y carbohidratos. En los componentes inorgánicos se encuentran el aluminio, hierro, calcio, magnesio, titanio, sodio, níquel, azufre, cloro, cromo, yodo, entre otros. Ver anexo A. El color del lodo varía por su relación entre la demanda química de oxígeno (DQO) y la masa de sólidos suspendidos volátiles (SSV) pudiendo ser de acuerdo al tipo de planta de tratamiento, café, gris o negro. Tiene un olor fuerte debido a la presencia de materia orgánica en proceso de oxidación.

El conocimiento de los componentes de un lodo es importante para estimar cuáles condiciones prevalecerán durante el espesado y para determinar qué efectos impondrán las características de los lodos en la aplicación específica en la que se utilicen. Otra característica importante a tomar en cuenta es el contenido en microorganismos, los que utilizan nutrientes en solución para su crecimiento celular, contribuyendo así a la limpieza del agua residual. La biocenosis de los lodos activos da información sobre las condiciones y estructura de los mismos y del grado de limpieza que se alcanzará.

Las bacterias que se reproducen en este tipo de ambientes utilizan los nutrientes contenidos en las aguas y lodos residuales para su propia reproducción y metabolismo. Son bioreductores y su papel ecológico es indispensable para la degradación de materia orgánica, lo que permite la estabilización de residuos orgánicos existentes en las plantas de tratamiento. Son responsables del aumento de los lodos activos en plantas domésticas de tratamiento de aguas. Además de bacterias, existen en los lodos activos un gran número de especies de protozoos como flagelos, ciliados y amebas. Los protozoos son organismos de una célula que puede nutrirse de materia orgánica y bacterias.

El agua es el componente principal de los lodos residuales. El contenido en agua depende del tipo de lodo (primario, secundario o terciario) y del tipo de estabilización (aerobia o anaerobia). El lodo crudo tiene un contenido generalmente en agua del 93% a 99% de manera que el deshidratado o secado es necesario para su uso posterior, disposición y manejo. El segundo componente principal es la materia seca, que está formada por sólidos, tanto orgánicos como inorgánicos.

Los datos analizados en este trabajo corresponden a los muestreos de lodos realizados por el Laboratorio ABC en los meses de Julio del 2010 y 2011. Las muestras fueron adecuadamente colectadas, preservadas, elaborada su cadena de custodia respectiva y enviadas para su análisis correspondiente. A las muestras del residuo identificado como lodos deshidratados STP se le practicaron los análisis correspondientes para determinar sus características de corrosividad, reactividad, inflamabilidad y toxicidad (CRIT) de acuerdo a los procedimientos y parámetros considerados en las normas NOM-052-SEMARNAT-2002 y NOM-053-SEMARNAT-1993. Los resultados de las pruebas efectuadas se muestran en el Anexo B.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

Para el desarrollo del estudio de los lodos residuales de la PTAR en la central termoeléctrica la Rosita se plantearon tres fases:

1. Se realizó una investigación bibliográfica del estado del arte en el manejo de lodos procedentes del tratamiento de aguas residuales. Esta revisión se enfocó en las alternativas de solución con énfasis en la protección ambiental global, esto es, del agua, suelo y aire, por lo que se analizaron los efectos de cada alternativa propuesta sobre los diferentes estados de los lodos (sólidos y líquidos).

2. Se evaluaron las características de los lodos y aguas residuales tanto de la PTAR como de la planta de poder La Rosita 1 y 2. Los lodos de la PTAR ya han sido caracterizados conforme a las Normas Oficiales Mexicanas NOM-052-SEMARNAT-2005 y NOM-004-SEMARNAT-2002 (ambas serán descritas en la sección 4.2.2). También se investigaron las condiciones climáticas de la región de Mexicali.

3. Finalmente se realizó un análisis y estimación del potencial de reuso y tratamiento de los lodos generados en la PTAR La Rosita para la región de Mexicali.

En la primera fase del estudio, se revisaron las alternativas del uso, tratamiento, aprovechamiento y destino de los lodos, entre las que se encuentran: (1) Aplicación para mejoramiento de suelos y como fertilizante agrícola; (2) La producción de metano, obtenido a partir de la digestión anaerobia; (3) La co-combustión; y (4) Oxidación con agua en estado súper crítico, entre otros. En esta fase se pretendió llevar el análisis tanto de la reducción, reuso y disposición de cada tecnología disponible de manera independiente, sin embargo al resultar redundante, se optó por conllevar la metodología del análisis de una manera general.

En la segunda fase se evaluó el análisis de los lodos conforme a las Normas Oficiales Mexicanas NOM-052-SEMARNAT-2005 que establece el procedimiento para identificar si un residuo es peligroso, el cual incluye los listados de los residuos peligrosos y las características que hacen que se consideren como tales. y NOM-004-SEMARNAT-2002 que contiene especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. Así, a partir de estas normas y considerando principalmente su contenido en metales pesados y patógenos, se obtuvo su clasificación para su reuso.

Se evaluaron también las condiciones climáticas de Mexicali donde según el atlas de climas de los municipios de México se señala que este municipio presenta cuatro subclimas diferentes dentro del grupo de secos-áridos, con escasa precipitación, distribuidos de la siguiente forma: 1. el clima cálido seco predomina en el 47 % del territorio municipal 2. el clima semicálido seco abarca el 37 %. 3.- el clima templado seco sólo cubre una pequeña parte del oeste del municipio y representa el 6 % 4.-el clima templado semiseco cubre el 10 % y se localiza en la zona central oeste, comprendiendo parte de las sierras de Juárez y San Pedro Mártir. Por otro lado, el flujo de vientos provienen de noroeste a suroeste la mayor parte del año y su precipitación pluvial anual promedio es de 132 milímetros, con una alta incidencia solar en gran parte del año.

Debido a las condiciones climáticas se evaluaron los lodos para un posible tratamiento de secado y/o estabilización; esto para un uso factible como composta o su reducción para disposición. Esta evaluación se realizó con el software TRNSYS 16 (Thermal Energy System Specialists 2004) (fig. 8), una simulación del fenómeno de invernadero, para determinar la temperatura máxima posible que se puede presentar en él. El TRNSYS se compone de dos partes. La primera es un motor (llamado núcleo) que lee y procesa el archivo de entrada, de forma iterativa resuelve el sistema, determina la convergencia, y variables de tramas del sistema. El núcleo también proporciona utilidades que (entre otras cosas) determinan las propiedades termo físicas, puede invertir matrices, realizar regresiones lineales, interpolar archivos de datos externos. La segunda parte de TRNSYS es una extensa biblioteca de componentes (TYPE), cada uno de los modelos representa una parte del sistema. Los modelos se construyen de tal manera que los usuarios pueden modificar los componentes existentes o diseñar el suyo propio, acorde a las características del medio ambiente (<http://www.trnsys.com> 2013)

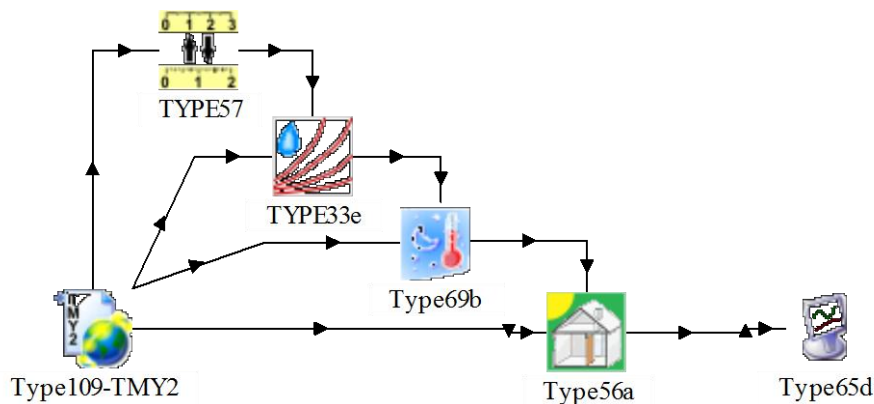


Figura 8. Esquema de simulación para el proceso de secado usando el software TRNSYS

El TRNSYS se compone de dos partes. La primera es un motor (llamado núcleo) que lee y procesa el archivo de entrada, de forma iterativa resuelve el sistema, determina la convergencia, y variables de tramas del sistema. El núcleo también proporciona utilidades que (entre otras cosas) determinan las propiedades termo físicas, puede invertir matrices, realizar regresiones lineales, interpolar archivos de datos externos. La segunda parte de TRNSYS es una extensa biblioteca de componentes, cada uno de los modelos representa una parte del sistema. Los modelos se construyen de tal manera que los usuarios pueden modificar los componentes existentes o diseñar el suyo propio, acorde a las características del medio ambiente.

Se consideró para el uso del TRNSYS 16 el type 56 (fig. 9) que es una interface para modelaje de construcción de áreas con las características en los elementos estructurales que se muestran en la tabla 2. Las características térmicas de los materiales fueron tomadas de la sociedad americana de calefacción, refrigeración y aire acondicionado de los Estados Unidos (ASHRAE por sus siglas en inglés), de Jones G. F. y Jones R. W. 1999, así como de la NOM-020, Norma Oficial Mexicana de Eficiencia Energética en edificaciones, envolvente de edificios residenciales. Y de la asociación americana de materiales y pruebas ASTM por sus siglas en inglés.

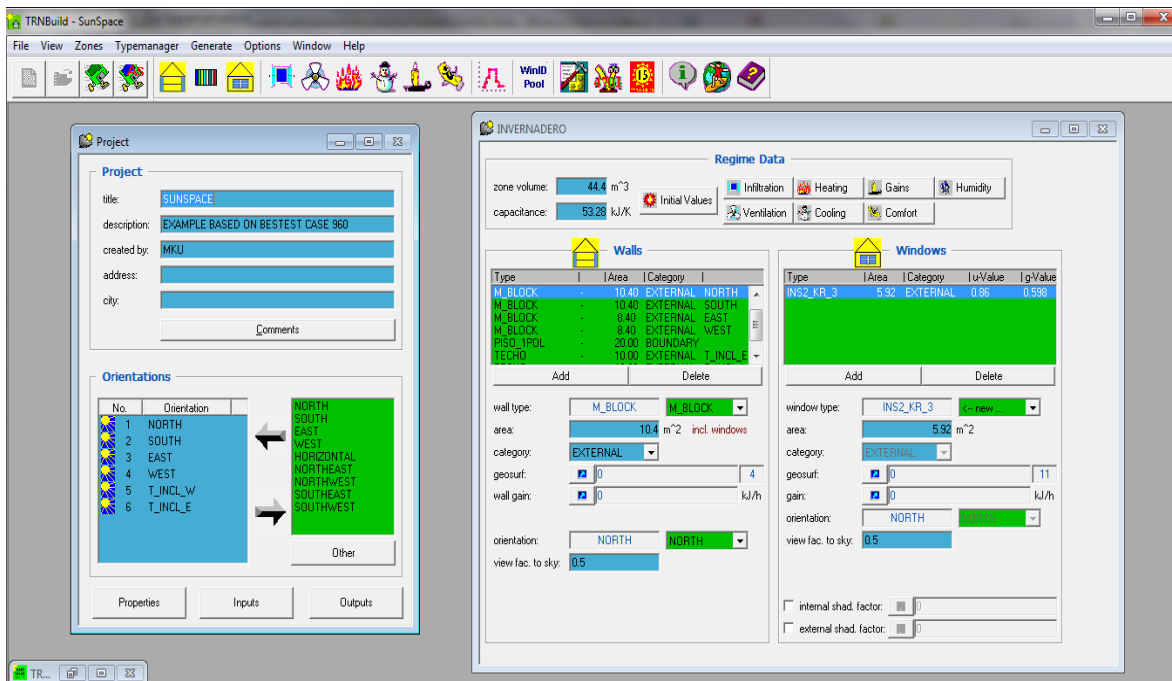


Figura 9. Esquema de la interface Type 56 utilizado para el modelaje de los materiales de construcción del secador.

Para efectos del cálculo de la temperatura máxima posible dentro del secador, se tomaron en cuenta las temperaturas diarias reportadas por la estación meteorológica del aeropuerto de Mexicali y se cargaron los datos resultantes en el type 109.

Como parte de la evaluación del reuso de los lodos, se tomaron en cuenta las características de los suelos de las zonas aledañas a la planta de tratamiento, referidas ampliamente en la literatura consultada como tipo de suelos yérmoles y xerosoles, característicos de zonas áridas y semiáridas, pobres en materia orgánica y ligeramente alcalinos. Con el fin de corroborar lo anterior se hicieron análisis de pH, contenido de humedad y materia orgánica de los suelos mencionados, con el fin de determinar posibles receptores de los lodos tanto crudos como en composta. Para lo anterior se trazó una malla de 10 puntos (fig. 10) de muestreo dentro del área de reserva de la propia PTAR. El muestreo, de suelos como de los lodos, se hizo siguiendo el protocolo establecido en la NOM-021-SEMARNAT-2000. Las muestras se tomaron a una profundidad de entre 20 y 30 cm, con pala manual metálica, el material obtenido (aprox. 1 kg) se depositó en bolsas de plástico debidamente rotuladas y posteriormente en laboratorio se molieron y se tamizaron, para determinar el pH se usó un medidor con electrodo de vidrio y de referencia.

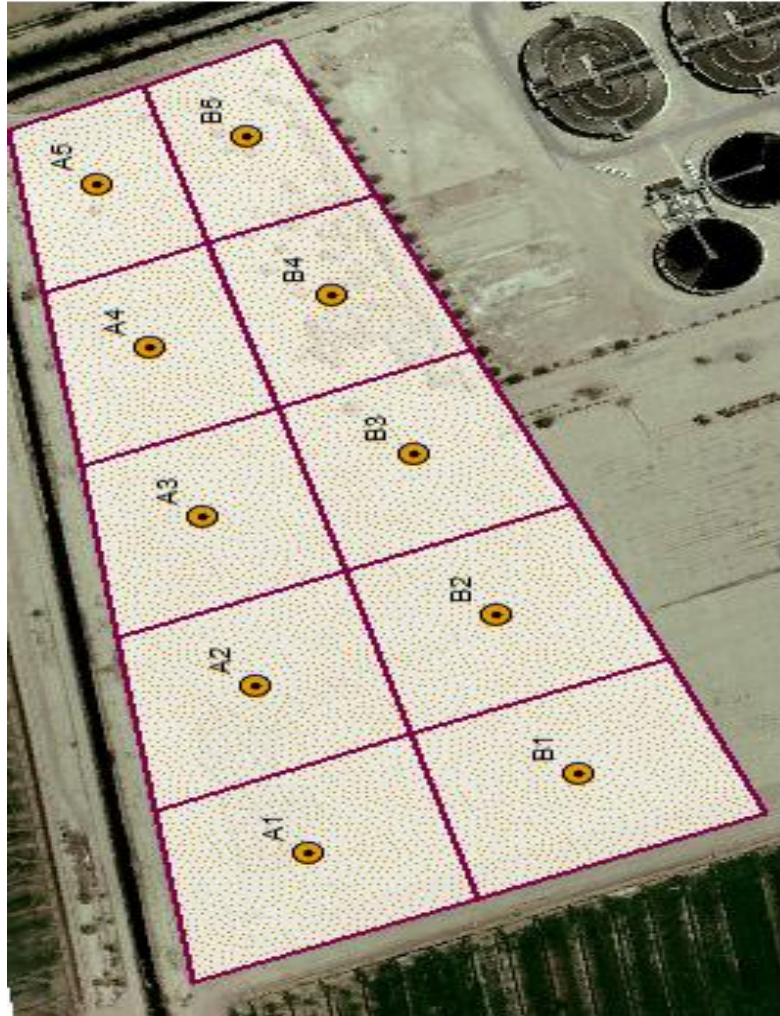


Figura 10. Malla de muestreo en la PTAR de la Rosita.

4. MARCO REFERENCIAL

4.1. *Revisión de tecnologías para el reuso y tratamiento de lodos.*

En el proceso de tratamiento de aguas residuales se generan subproductos, como los lodos residuales (biosólidos), originados durante el tratamiento primario (físico y / o químico), el secundario (biológico) y el tratamiento terciario (adicional a la extracción secundaria, a menudo de nutrientes), que representan un serio problema por su volumen de producción y necesidad de estabilización, lo que hace complejo su manejo y disposición. Las fuentes de sólidos en una planta de tratamiento varían según el tipo de planta y su método de operación. Obviamente, con el fin de tratar y eliminar el lodo que se produce en una planta de aguas residuales, es fundamental conocer las características de los lodos que se procesarán.

Una composición química típica y propiedades de los lodos no tratados y digeridos se muestran en la tabla 2. Cabe señalar que muchos de los componentes químicos, incluyendo nutrientes, son importantes cuando se considera la disposición final de los lodos y el líquido extraído durante su tratamiento. Según Metcalf y Eddy (2003), el control de los niveles de pH, alcalinidad y el contenido ácido orgánico son parámetros importantes en el proceso de digestión anaeróbica. Además, conocer el contenido de metales pesados, pesticidas y los hidrocarburos es importante para determinar que lodos van a ser incinerados o depositados en rellenos sanitarios o utilizados en procesos de gasificación, pirólisis, combustión, oxidación en estado supercrítica del agua, o usos agrícolas (Wang et al. 2008).

A nivel mundial, el reuso de los lodos residuales es una práctica aceptada en muchos países debido principalmente, a que es considerado como la opción más aceptable desde el punto de vista ambiental. Sin embargo, para que esta práctica pueda ser llevada a cabo se requiere que los lodos cumplan con ciertos criterios de calidad encaminados a disminuir los riesgos a la salud y al ambiente. Así, es esencial aplicar tecnologías de tratamientos factibles, seguros y sostenibles en el reuso de lodos provenientes de plantas de tratamiento de agua municipal. Actualmente, en diversos países se promueve el uso benéfico de los lodos residuales en diversas aplicaciones (Wang et al. 2008). A continuación se presenta una revisión de las tecnologías disponibles para la reutilización y tratamiento de lodos residuales y/o biosólidos.

Tabla 2. Composición química típica y propiedades del lodo tratado/digerido. Modificado de Fytily y Zabaniotou 2006.

Parámetros	Sin Tratar		Digerido		Rango Activo
	Rango	Típico	Rango	Típico	
Solidos Totales (TS) %	2.0-8.0	5.0	6.0-12.0	10.0	0.83-1.16
Solidos volátiles (% de TS)	60-80	65	30-60	40	59-88
Grasas y Aceites					
Éter Soluble	6-30	-	5-20	18	-
Éter extracto	7-35	-	-	-	5-12
Proteínas (% de TS)	20-30	25	15-20	18	32-41
Nitrógeno (N, % of TS)	1.5-4	2.5	1.6-6.0	3.0	2.4-5.0
Fosforo (P ₂ O ₅ , % de TS)	0.8-2.8	1.6	1.5-4.0	2.5	2.8-11.0
Oxido de Potasio (K ₂ O, % de TS)	0-1	0.4	0.0-3.0	1.0	0.5-0.7
Celulosa (% de TS)	8.0-15.0	10	8.0-15.0	10.0	-
Hierro (no como sulfuro)	2.0-4.0	2.5	3.0-8.0	4.0	-
Sílice (SiO ₂ , % de TS)	15.0-20.0	-	10-20	-	-
Alcalinidad (mg/l como CaCO ₃)	500-1500	600	2500-3500	-	580-1100
Ácidos Orgánicos (mg/l como ácido acético)	200-2000	500	100-600	3000	1100-1700
pH	5.0-8.0	6.0	6.5-7.5	7.0	6.5-8.0

4.2. Aplicación como mejorador de suelos y fertilizante agrícola.

Los lodos provenientes de las plantas de tratamiento de aguas residuales contienen fósforo y nitrógeno (Fytili y Zabaniotou, 2006), lo que les da un valor agregado como fertilizante dado que estos elementos resultan indispensables para el crecimiento de las plantas; es por esto que su aplicación en el suelo, mediante inyección o depositación superficial directa, se ha practicado ampliamente (Salcedo-Pérez et al 2006). Además, la aplicación de los biosólidos estimula la productividad e incrementa la materia orgánica y el contenido de otros micronutrientes, también esenciales para el desarrollo de los cultivos. Así mismo, al adicionar biosólidos se mejoran sus propiedades físicas, sobre todo cuando son aplicados a suelos duros con estructura pobre, incrementando la porosidad del suelo, mejorando su textura y su conductividad hidráulica (Epstein 1975; Ojeda et al. 2003, Andrade et al. 2000). Varios autores refieren que un manejo apropiado de la aplicación de biosólidos resulta en un incremento significativo del rendimiento de los cultivos debido al mayor aporte de nutrientes. (eg. Boswell 1975; Morera et al. 2002; Sigua et al. 2005; Wang et al. 2006)

Los biosólidos son comúnmente aplicados a tierras cultivables, bosques, parques públicos, campos de golf y, en algunos casos, a jardines domésticos según la United States Environmental Protection Agency (1994) [USEPA por sus siglas en inglés]. En el mundo, una gran proporción de estos biosólidos son utilizados, además de en la producción agrícola, en el mejoramiento de tierras degradadas, como lo son las áreas de minas y de rellenos sanitarios. Entre los países que utilizan los biosólidos como mejoradores de suelo encontramos a Australia, Estados Unidos y algunos países Europeos (Haering et al. 2000).

Por otro lado, los lodos residuales pueden contener varios elementos que pueden resultar dañinos cuando entran en la cadena de alimentación humana, como lo son los metales pesados. Por esto en varios países, sobre todo de la comunidad europea, se han ido endureciendo las medidas para el uso de estos biosólidos, haciéndose cada vez más restrictivas (Lundin et al. 2003). No obstante la Directiva 91/271/CEE de la Comunidad Europea referente al tratamiento de aguas residuales urbanas, Urban Waste Water Treatment (UWWTD), ha hecho obligatorio contar con estaciones de tratamiento de agua en todos los poblados de más de 2000 habitantes, en todos los estados miembros antes del 31 de diciembre de 2005 (AEMA, 2005), por lo que la producción de lodos ha aumentado. Así, en toda Europa, el debate acerca del reuso de estos lodos en el sector agrícola se ha ido extendiendo cada vez más. En este debate la industria alimenticia, los agricultores y la ciudadanía en general son importantes actores en el tema. De este modo, en cada país de la comunidad europea, se han ido haciendo las adecuaciones necesarias en sus legislaciones, de acuerdo a las características propias de cada región.

En la actualidad, los metales pesados en los lodos de aguas residuales están regulados para el uso agrícola en Europa. El total de contenido de metales pesados en los suelos adicionados con lodos están restringidas, así como la cantidad máxima media anual de aplicación de metales pesados en los suelos durante un período de 10 años, para cumplir con los requisitos de calidad para la aplicación de estos residuos en los suelos agrícolas. Zn, Cu, Cr, Ni, Cd, Pb, y Hg son los metales pesados que se encuentran actualmente regulados (Smith 1996).

En el caso de Suecia, cada año las plantas municipales de tratamiento de aguas residuales generan alrededor de 230.000 toneladas de lodos (materia seca). La aplicación de lodos en la agricultura resuelve el problema de eliminación del residuo y hace uso de los componentes de valor, sin embargo, durante mucho tiempo ésta ha sido una práctica controvertida. El uso agrícola de lodos ha reducido la necesidad de los agricultores de fertilizantes minerales y se ha mejorado la estructura del suelo. Los agricultores han recibido a menudo el lodo de forma gratuita. Como resultado, desde la construcción de plantas de tratamiento de aguas residuales en Suecia, que tuvo lugar principalmente en los años 1950 y 1960, se ha extendido el uso de los lodos en las tierras agrícolas, aunque con grandes variaciones regionales.

Debido a que las aguas residuales contienen sustancias nocivas y potencialmente peligrosas, algunos involucrados se oponen a su uso en la agricultura. Con diversos grados de intensidad, las ventajas y desventajas del uso de lodos en la agricultura han sido objeto de debate desde finales de 1960. A pesar de las dificultades para llegar a acuerdos, la utilización de los lodos es aún de actualidad por varias razones (Bengtsson and Tillman 2004):

- El énfasis político en el reciclaje de nutrientes como parte de un desarrollo sostenible;
- Los beneficios económicos del uso de lodos en la agricultura, tanto para los municipios como para los agricultores;
- Los inconvenientes de otras opciones de manejo de lodos, además de sus altos costos.

El debate de lodos refleja un conflicto objetivo de la política ambiental de Suecia, y que de alguna forma se replica en todo el mundo. Para guiar a la sociedad en una dirección sostenible, el parlamento ha establecido 15 objetivos de calidad ambiental. El tema de los lodos se relaciona con tres de estos objetivos, uno es que los residuos deben ser reciclados de manera que la necesidad de extraer los recursos sea mínimo; las concentraciones ambientales de sustancias tóxicas debe estar cerca de los niveles naturales y, en el largo plazo, que la capacidad de producción de las tierras de cultivo

pueda ser preservado. La utilización de los lodos en la agricultura es motivada por el primero de estos objetivos, pero puede ir en contra de los dos últimos (Bengtsson and Tillman 2004). Si bien es cierto que la utilización de los lodos en la agricultura se redujo significativamente de alrededor de 25-30% a finales de 1990 a poco más de un 10% en 2001 (Johansson, 2002), el volumen utilizado en el sector agrícola en la actualidad es aun importante.

En el caso de Dinamarca la producción total de lodos ha aumentado desde el comienzo de la década de 1980 cuando iniciaron las grandes inversiones en plantas de tratamiento de aguas residuales. En los últimos cinco años, la producción de lodos se ha mantenido estable entre 150.000 y 160.000 toneladas (materia seca) por año, con una caída a 140.000 toneladas en 2002. El lodo danés ha sido históricamente manejado en una de las tres formas principales. Se ha utilizado como fertilizante en tierras agrícolas, se ha depositado en vertederos controlados o se ha incinerado, ya sea internamente en las plantas de tratamiento o externamente en instalaciones de incineración de gran tamaño (Jensen y Svend-Erik 2004).

Los ayuntamientos de Dinamarca están obligados a tener la capacidad de almacenamiento al menos de nueve meses de producción de lodos provenientes de las plantas de tratamiento, si el lodo está previsto para su uso en la agricultura. El lodo se almacena en los términos especificados en la legislación vigente a partir de 1997, que excluye las pilas de campo. De 1995 a 2001, la fracción relativa de lodos residuales que se utiliza como fertilizante por los agricultores disminuyó de aproximadamente el 70% a 60%, como resultado del aumento de requisitos de calidad de los mismos. En 2002 volvió a aumentar a 66%, principalmente como resultado del aumento de la producción de composta a partir de los lodos que se usan en la agricultura (Jensen y Svend-Erik 2004).

En general entre las alternativas disponibles para la disposición final de los lodos se destaca el reuso agrícola del residuo, que dentro de criterios seguros, es una de las posibilidades de menor impacto ambiental y costo de operación (Lavado y Taboada 2002). Ya que se estaría aprovechando un residuo de nulo o bajo costo lo que mejoraría la relación costo- beneficio (Cuevas y Walter, 2004).

4.2.1. Experiencias en resultados y rendimientos

Tenemos como referencia varios estudios realizados alrededor del mundo (e.g. Quintero et al 1998, Uribe 2002, Jamil et al 2006, Wang et al 2002, Tapia 2003; Martín del Campo *et al.* 2002, Kelley et al 1984, Snyman et al 2000), donde se muestran las mejoras obtenidas en los suelos tratados con lodos. Como ejemplo mostramos resultados obtenidos en dos estudios: uno en Chile (entre los años 2001 y 2003) y el otro en México (2002). En el primer estudio se concluye que a partir del tercer año del uso de lodos, el cultivo muestra un rendimiento ligeramente superior al que usa fertilizantes minerales (Tabla 7). En el segundo estudio, realizado por la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM) se concluyó que el porcentaje de materia orgánica y la capacidad de intercambio catiónico, no presentaron diferencias significativas entre tratamientos; sin embargo, la concentración de fósforo disponible fue significativamente mayor y el pH tuvo una tendencia ligeramente ácida a mayor cantidad de lodos aplicados Ortiz et al. (1999) aplicaron dosis de 1 y 5 t/ha de lodos residuales a un cultivo, de maíz, observando aumentos en la cantidad de materia orgánica, de N, y de P total y disponible. En cuanto a estudios en donde se han aplicado hasta 40 t/ha de lodos residuales, se reporta un incremento en la producción de maíz (*Zea mays*), así como un incremento en la concentración de N, P y K disponible (Andrade et al. 2000).

Tabla 3. Rendimiento de cultivos de Maíz y Trigo, expresada en Kg/ha. Adaptado del estudio de la INIA- La Platina, 2001-2003. *F: se refiere al tratamiento con fertilizante mineral, L: se refiere al tratamiento con lodos.*

Maíz Choclero			
Tratamiento	2001	2002	2003
100% F	21.101	16.974	22.250
100% L	13.645	12.845	23.872
50% F – 50% L	16.252	15.532	21.190
Testigo	11.446	12.442	12.000

Tratamiento	Trigo	
	2001	2002
100% F	4.160	2.100
100% L	4.460	2.620
50% F – 50% L	4.390	2.770
Testigo	4.670	1.290

4.2.2. Legislación específica mexicana

En México, las especificaciones y los límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final, en biosólidos, se encuentran en la norma oficial mexicana NOM-004-SEMART-2002. La NOM-052-SEMARNAT-1997 establece los criterios que determinan si los lodos son peligrosos por su toxicidad al ambiente, es decir, se describen las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos. Además, se resumen los valores máximos permisibles de metales pesados y patógenos para su clasificación agronómica, según la normativa mexicana (tablas 2 a 4). Así mismo, se requiere conocer las características fisicoquímicas del lodo residual, las condiciones físicas de la región y la viabilidad económica ya que estos parámetros condicionan la elección de los cultivos y una práctica ambientalmente sustentable.

Los biosólidos se clasifican en clase: A, B y C en función de su contenido de patógenos y parásitos en base seca (Tabla 3). De acuerdo con esta clasificación se establece el aprovechamiento de los lodos en usos tales como uso forestal o urbano que se presenta en la Tabla 4. En caso del reuso de los lodos con fines agrícolas y mejoramiento de suelos, la misma norma NOM-004-SEMARNAT-2002, específica que habrá que sujetarse a lo establecido en la Ley Federal de Sanidad Vegetal.

Tabla 4 Límites máximos permisibles de metales pesados en lodos y biosólidos para su aprovechamiento. *Modificado de la NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-004-SEMARNAT-2002.*

Contaminantes Determinados En Forma Total	Excelentes mg/Kg Base Seca	Buenos mg/Kg Base Seca
Arsénico	41	75
Cadmio	39	85
Cromo	1200	3000
Cobre	1500	4300
Plomo	300	840
Mercurio	17	57
Níquel	420	420
Zinc	2800	750

Tabla 5. Clasificación de biosólidos en función de su contenido de patógenos. *Modificado de la NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-004-SEMARNAT-2002*

Clase	Indicador Bacteriológico De Contaminación	Patógenos	Parásitos
	Coliformes Fecales *NMP/g Base Seca	Salmonella Spp. NMP/g Base Seca	Huevos De Helminthos/g Base Seca
A	-	75	*ND
B	20-40	85	ND
C	1000-1500	-	40.26

*NMP Número más probable * ND No detectado

Tabla 6. Aprovechamiento de los biosólidos con un contenido de humedad hasta el 85%.
Basado en la NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-004-SEMARNAT-2002

Tipo	Clase	Aprovechamiento
Excelente	A	<ul style="list-style-type: none"> •Usos Urbanos Con Contacto Público Directo Durante Su Aplicación •Los Establecidos Para Clase B Y C
Excelente o Bueno	B	<ul style="list-style-type: none"> •Usos Urbanos Sin Contacto Público Directo Durante Su Aplicación •Los Establecidos Para Clase C
Excelente o Bueno	C	<ul style="list-style-type: none"> •Usos Forestales •Mejoramientos De Suelos •Usos Agrícolas

4.2.3. Caso de EUA y Europa.

Tanto en Europa como en Estados Unidos, las restricciones asociadas al procesamiento y utilización de los lodos tienden a incrementarse conforme aumenta la probabilidad de contacto con la población (el caso de México es similar). Por ello los requisitos legales varían en función de las opciones de utilización o disposición de residuos. La utilización agrícola de los lodos procedentes de todo tipo de estaciones depuradoras de aguas residuales urbanas está sujeta, además de los requisitos ya mencionados, a que la concentración en metales pesados en el terreno se mantenga por debajo de los límites considerados peligrosos.

En la Tabla 5 se presentan los valores de las concentraciones máximas de metales pesados en los biosólidos para que puedan considerarse aptos para uso agrícola de acuerdo a la normatividad europea (CE) y estadounidense (USEPA). Para fines comparativos, en la última columna se anexan los valores de metales encontrados en el análisis de lodos de “la Rosita”.

Según la legislación de la Comunidad Europea (Consejo CE, 1986) y la específica del Estado Español (MAPA, 1990; MAPA, 1993) se exige también que los lodos hayan sido sometidos a un tratamiento previo. Este tratamiento puede ser por vía biológica, química o térmica, mediante almacenamiento a largo plazo o por cualquier otro procedimiento apropiado, de manera que se reduzcan, de manera significativa, su poder de fermentación y los inconvenientes sanitarios de su utilización. En la tabla 6 se muestra el aporte máximo permitido de metales pesados por hectárea al año en la CE y en los EUA.

Tabla 7. Valores máximos permitidos en contenido de metales pesados en lodos utilizados en agricultura según la legislación europea* (Consejo CE, 1986) y la estadounidense (USEPA, 1993), y concentraciones en lodos de la PTAR (Termoeléctrica La Rosita, informe interno, 2011).

Metal	Concentración en el biosólido (mg/Kg)		PTAR "La Rosita" (mg/kg)
	CE*	EUA	
Arsénico	-	75	ND
Cadmio	20-40	85	ND
Cromo	1000-1500	-	40.2
Cobre	1000-1750	4300	137
Plomo	750-1200	840	39.1
Mercurio	16-25	57	2.0
Molibdeno	-	75	-
Níquel	300-400	420	21.0
Selenio	-	100	-

Tabla 8. Aporte máximo permitido de metales pesados por hectárea de terreno cultivado por año. Valores correspondientes a la normativa estadounidense (USEPA. 1993) y europea (Consejo CE, 1986).

Metal	Aporte de Contaminante(kg/ha/año)	
	CE	EUA
Arsénico	-	2.0
Cadmio	0.15	1.9
Cromo	3.0	-
Cobre	12	75
Plomo	15	15
Mercurio	0.1	0.85
Molibdeno	-	-
Níquel	3	21
Selenio	-	5.0
Zinc	30	140

4.3. Fuente de energía.

La creciente demanda de energía primaria y la disminución de la reserva de combustibles fósiles, plantean la preocupación a nivel mundial de cómo mantener el suministro de energía fiable y asequible para futuras generaciones. Dos enfoques estratégicos para hacer frente a este problema se encuentran actualmente en desarrollo, incluida la explotación y el despliegue de las energías renovables (biomasa, por ejemplo, energía solar, eólica, hidráulica y geotérmica), así como la mejora de la eficiencia energética en la producción de energía y su utilización.

Recientemente, el interés en la valorización energética de lodos provenientes de plantas de tratamiento de agua residual han ido en aumento, probablemente debido a que este concepto aborda de manera positiva y simultáneamente el tema de la energía y las preocupaciones ambientales asociadas con el tratamiento convencional de lodos como relleno sanitario y la aplicación al suelo; principalmente debido a que el vertido de lodos genera emisiones indeseables (por ejemplo, los lixiviados y en el relleno sanitario gas) para agua, aire y suelo, mientras que aplicación de los lodos a la tierra incurre en la contaminación del suelo local por metales pesados y patógenos (Suh y Rousseaux 2002).

La biomasa puede considerarse como el recurso energético renovable más factible de utilizar ya que está disponible a nivel local y en abundancia, técnicamente flexible en la producción de energía, y lo más atractivo, es el único recurso de energía renovable que puede ser utilizado para producir combustible líquido. La biomasa es el término general utilizado para describir materia orgánica. En la Unión Europea en su conjunto, la producción per cápita de los lodos de plantas de tratamiento se estima en 90 g por persona al día (Davis 1996), lo que significa que la actual producción anual de lodos de las plantas de tratamiento supera los 10 millones de toneladas. En China, la cantidad de lodos provenientes de dichas plantas producidos en el año 2010 se estima que alcanzo alrededor de 100 millones de toneladas (X.Wang. et al 2008). En el contexto global, se cree que la salida de lodos en las próximas décadas seguirá incrementándose gradualmente, teniendo en cuenta el desarrollo de la población, la urbanización y la industrialización.

Las distintas opciones para la recuperación de la energía a partir de los compuestos orgánicos en lodos de aguas residuales, se puede subdividir en nueve grupos: (1) la digestión anaerobia de los lodos, (2) la producción de biocombustibles a partir de lodos, (3) la producción directa de electricidad a partir de lodos mediante células de combustible microbianas, (4) incineración de lodos residuales con recuperación de energía, (5) co-combustion de lodos, (6) gasificación y pirólisis de lodos residuales, (7) utilización de lodos como fuente de materia prima en la producción de cemento Portland

y materiales de construcción, (8) oxidación supercrítica del agua en lodos residuales, y (9) tratamiento hidrotérmico de los lodos (Rulkens 2008).

4.3.1. Digestión anaerobia de lodos

La producción de metano, obtenido a partir de la digestión anaerobia, se ha mantenido como la forma más común de obtener energía a partir de los biosólidos. Mediante este proceso, a la par de la generación de combustible, se reduce el volumen de los lodos y se logra también la eliminación de los patógenos existentes.

La digestión anaerobia es el proceso que llevan a cabo las bacterias en ausencia de oxígeno. El resultado de esta digestión es biogás con alto contenido de metano que se compone generalmente de un 60% de metano y un 40% de dióxido de carbono (Metcalf and Eddy 2003). Sin embargo, para poder utilizar esta tecnología se requiere habilitar grandes áreas para la digestión de los biosólidos en el medio acuoso, además de utilizar grandes cantidades de polímero, para el desecado de los lodos.

El proceso de digestión anaeróbica consiste en tres etapas: la primera etapa de hidrólisis en el que los compuestos orgánicos, tales como polisacáridos, proteínas y grasas, son hidrolizados por enzimas extracelulares, una segunda etapa de acidificación en la que los productos de la hidrólisis se convierten en hidrógeno, acetato, y ácidos grasos volátiles, y una tercera etapa en que el biogás, una mezcla de metano y dióxido de carbono, es producido a partir de hidrógeno, metanoato, y acetato.

Los enlaces de los ácidos grasos volátiles de alto peso molecular deben romperse a hidrógeno, metanoato y acetato, para que sea posible su conversión posterior a metano y dióxido de carbono. La metanogénesis completa se produce por la mezcla de las comunidades microbiológicas, con el resultado del metano como el único compuesto orgánico reducido. Todo el proceso puede tener lugar en un reactor simple o en un reactor de dos etapas, una para la hidrólisis y la acidificación y uno más para la producción de biogás. El biogás se puede utilizar como una fuente de energía para la producción de electricidad y/o calor. La gran mayoría de los procesos anaeróbicos aplicados en la práctica son mesófilas.

El tiempo de retención de lodos en los digestores anaeróbicos es de aproximadamente 20 días. El volumen de biogás producido depende fuertemente del tipo de lodos y también de las condiciones de funcionamiento del digestor. La producción de gas desde una mezcla primaria y secundaria (biológico), de los lodos asciende aproximadamente a 1 m³ de biogás por kg de sólidos orgánicos biodegradados (Rulkens 2008).

También es posible digerir lodos mediante un proceso termófilo a una temperatura de unos 55 °C. En comparación con la digestión mesófila, el tratamiento termófilo tiene algunas ventajas, tales como una mayor producción de biogás, un grado más alto de destrucción de agentes patógenos, y una reducción mayor en la cantidad de sólidos y materia orgánica (Rulkens 2008). Además, el tiempo de retención del lodo en el reactor puede reducirse. Con las tecnologías de digestión estándar, aproximadamente solo entre el 20 y 30% de la materia orgánica se mineraliza (Camacho et al. 2002).

En el mundo se ha extendido la aplicación de la tecnología de digestión de lodo, principalmente motivada por sus beneficios relacionados con la energía; el beneficio principal es que el biogás tiene un alto valor calorífico y puede usarse para producir calor y electricidad. Recientemente, se ha centrado la atención en la mejora de la producción de biogás y la calidad (por ejemplo, alta relación de metano contra dióxido de carbono). Los esfuerzos realizados para este propósito involucran principalmente los siguientes puntos, 1) Optimización de condiciones de proceso (por ejemplo, el tiempo de retención de lodos y velocidad de carga de lodos); 2) La aplicación del proceso de etapas múltiples (temperatura por etapas y fases de la comunidad de microorganismos); 3) lodos de pre-tratamiento para aumentar la biodegradabilidad, incluyendo productos químicos (Cao y Pawlowsky 2012).

No obstante lo anteriormente señalado, debe tenerse en cuenta que después de la recuperación del biogás el contenido energético de la fracción residual es baja, lo que significa que la incineración de esta fracción con el objetivo de recuperar la energía se ha vuelto menos atractiva (Rulkens 2008).

4.3.2. Biocombustibles.

El proceso general de conversión microbiológica para la producción de energía se compone de dos etapas principales. El primer paso es una etapa de pre tratamiento que a menudo es necesario para hacer el sustrato accesible a la etapa de conversión biológica, denominada etapa de fermentación. Y una segunda etapa de biodisponibilidad, donde en general, los componentes de la biomasa, como el azúcar y el almidón, son fácilmente biodisponibles. Sin embargo, los componentes de las plantas, especialmente la pared celular, a menudo contienen grandes cantidades de lignocelulosa, que contiene un complejo de tres polímeros principales: celulosa, hemicelulosa y lignina (Rulkens. 2008). La clase de portador de energía que se produce depende fuertemente de los tipos de microorganismos y las condiciones del proceso aplicado, pudiendo obtener, metano, etanol, acetona, butanol, o hidrógeno.

Para los lodos residuales por ahora, la mayoría de la información disponible se centra sobre la producción de biogás (metano) (Rulkens. 2008).

En la actualidad, la fermentación de azúcares a etanol es el proceso mejor establecido para la conversión de la biomasa en energía (Claassens et al. 1999). Para una comparación, la estimación de un potencial mercado de etanol en la Unión Europea es aproximadamente 3.1 millones de litros/año, basado en una demanda prevista de petróleo de 134 mil millones de litros al final de este siglo (Ruiz- Altisent 1994). La producción de etanol de caña de azúcar se inició en Brasil y los Estados Unidos en la década de 1970. La capacidad de producción de Brasil en 1990 fue de alrededor del 15 mil millones de litros de etanol (Wyman y Hinman, 1990).

Por lo que se conoce, hay pocos estudios sobre la producción de etanol, butanol o acetona a partir de lodos. Una razón puede ser que su producción es menos atractiva debido a que el sistema de separación es complejo ya que es necesario separar estos componentes de manera selectiva (Rulkens. 2008).

Algunas investigaciones se han centrado en la producción de hidrógeno a partir de las aguas residuales. Sin embargo, los resultados no son muy prometedores, hasta ahora, y teniendo en cuenta la forma sencilla de producir metano y la gran experiencia con los procesos de producción de metano, es poco factible que la producción de hidrógeno a partir de lodos de depuradora se hará más atractiva que la producción de metano en el corto plazo.

En general, se puede concluir que hasta ahora la producción de combustibles líquidos o gaseosos distintos del metano (biogás) a partir de aguas residuales no es muy prometedora. Cuando la forma más sencilla de producir energía a partir de lodos es el metano; si se tiene en cuenta la experiencia con el proceso de producción de biogás, y la aplicación del biogás para la producción de electricidad y energía térmica, es dudoso que la producción del líquido mencionado o algunos otros combustibles a partir de lodos residual será en el futuro una alternativa seria para la producción de energía.

4.3.3. Producción directa de electricidad mediante celdas microbianas.

Las células microbianas de combustible pueden ser utilizadas para producir directamente electricidad a partir de una corriente de aguas residuales (fig. 11), que contienen compuestos orgánicos biodegradables (Rulkens 2008.)

Las células de combustible microbianas (MFC, por sus siglas en inglés) pueden dar una respuesta a varios de los problemas que el tratamiento de aguas residuales tradicionalmente enfrenta, porque permiten la recuperación de energía de las aguas residuales mientras que limita la producción excesiva de lodos (Rabaey y Verstraete, 2005). Sin embargo durante un período prolongado después de su concepción, las MFC permanecieron como una curiosidad científica por su limitada eficacia. Hoy en día, la

producción de energía en las MFC está aumentando, superando obstáculos importantes debido a la integración de los aspectos microbiano y electroquímico (Park y Zeikus, 2003; Rabaey et al., 2005a). Pero todavía existen varios cuellos de botella, que requiere un adecuado desarrollo (Aelterman et al. 2006).

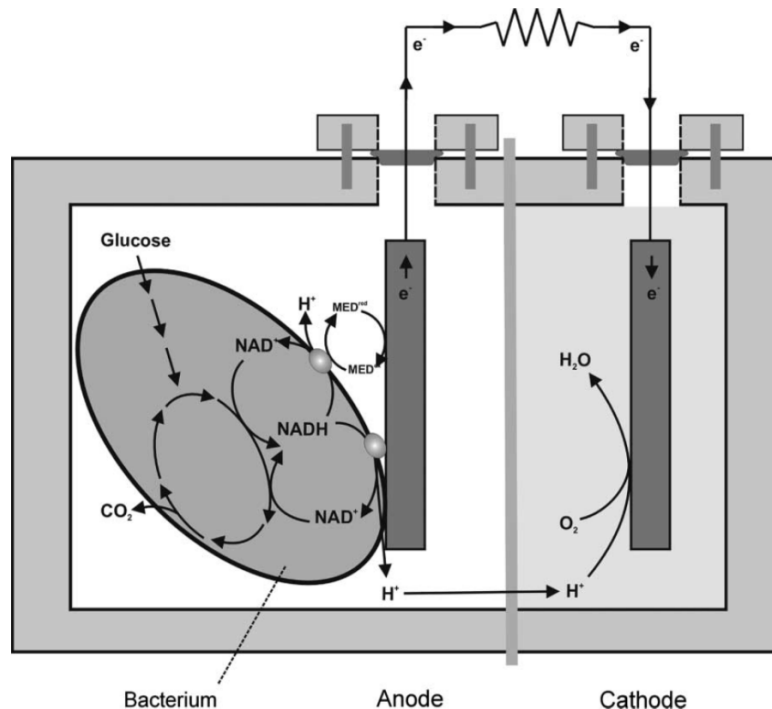


Figura 11. El principio de una célula de combustible microbiana (MFC, por sus siglas en inglés). El sustrato es metabolizado por las bacterias, que transfieren la ganancia de electrones hacia el ánodo. Modificada de Aelterman et al; 2006

Además, es también importante para los procesos de oxidación convencionales suprimir actividad microbológica del lodo en el reactor. También debe tenerse en cuenta que los lodos contienen compuestos orgánicos tóxicos, compuestos inorgánicos y también una cantidad sustancial de compuestos inorgánicos no tóxicos. No está claro aún lo que ocurre con los compuestos orgánicos tóxicos. Esto significa que el problema de los lodos no puede ser resuelto por completo por la aplicación de células de combustible microbianas solamente. Otro post-tratamiento de la corriente de desechos residuales será necesario. Por lo que en el presente no está claro hasta qué punto la producción directa de electricidad a partir de lodos residuales se convertirá en un proceso atractivo ya que depende no sólo del proceso microbiano de producción de electricidad en sí, sino también del efecto de este proceso en la cantidad y la composición de los lodos residuales.

4.3.4. Incineración y recuperación de energía.

En su caso y dependiendo de su uso o disposición final, los contaminantes en los lodos deben ser removidos. Usar la técnica de eliminación o la inmovilización de los lodos resulta en una pérdida irreversible de nutrientes como el fósforo, calcio, magnesio, potasio entre otros. En este sentido, el proyecto europeo SUSAN (Sostenible y Segura Re-utilización de los lodos de aguas residuales municipales para la recuperación de nutrientes) tiene como objetivo desarrollar una estrategia sostenible y segura para la recuperación de nutrientes de los lodos con tratamiento térmico. La Mono-incineración de lodos destruye completamente los contaminantes orgánicos en un primer paso. Los residuos de la incineración son las cenizas con un alto contenido de fósforo, pero aún contienen concentraciones de metales pesados por encima de los límites legales para el uso agrícola. Estas cenizas, además del fósforo presentan una baja biodisponibilidad, lo que resulta en una desventaja para su aplicación en la agricultura. Por lo tanto, se necesita aplicar un segundo tratamiento termoquímico encaminado a retirar los metales pesados y a transferir el fosforo a las fases minerales disponibles para las plantas.

La formación de los cloruros volátiles de metales pesados se da mediante la adición de un donante de cloro a temperaturas entre 800 y 1000 °C, muy por debajo del punto de fusión de las cenizas. Los cloruros volátiles de metales pesados se separan de la fase gaseosa. Además, las nuevas fases minerales se acumulan en las cenizas resultantes del proceso, obteniendo una solubilidad del fósforo en ácido cítrico de hasta el 100% un indicador de alta biodisponibilidad. (Adam et al.2007).

En si la incineración sigue siendo uno de los métodos más atractivos de disposición de los biosólidos, sobre todo en Europa, tomando en cuenta las restricciones legales de su uso como material de relleno y como abono agrícola. En este contexto, la posibilidad de incinerar los residuos se ha incrementado. El volumen de lodos incinerados respecto al volumen total de lodos producidos es: en Dinamarca alrededor del 24%, 20% en Francia, 15% en Bélgica, 14% en Alemania y en Estados Unidos y Japón el porcentaje se ha incrementado alrededor de un 25% (*Fytil y Zabaniotou, 2006*). La incineración de biosólidos ha sido comúnmente aplicada en ciudades con una gran población y poco espacio de tierra disponible, como sucede en Japón y algunos países europeos.

La incineración de lodos está dirigida a lograr una oxidación completa a alta temperatura de los compuestos orgánicos de lodos incluyendo también los compuestos tóxicos. Sin embargo, el incinerar los lodos no constituye en sí mismo un método completo de disposición ya que aproximadamente el 30% de los sólidos permanecen como remanente en forma de ceniza. El proceso puede ser aplicado a los lodos deshidratados mecánicamente o a los secos.

Los posibles problemas medioambientales relacionados con la incineración de los lodos son las emisiones de gases contaminantes a la atmósfera y la disposición de las cenizas. Sin embargo, existen desarrollos de tecnología estándar disponible para abatir las emisiones gaseosas de manera muy eficiente, por lo que las normas de calidad del aire pueden ser satisfechas. Además, la composición de las cenizas, especialmente con respecto a los metales pesados, no es un problema ambiental real, debido a que las altas temperaturas aplicadas en el proceso de incineración, inmoviliza los compuestos inorgánicos en el lodo, y los metales pesados, además el proceso es resistente a la lixiviación (Rulkens. 2008).

En general, en el proceso de incineración se tiene que tratar con grandes cantidades de gases contaminantes, los costos de un sistema de tratamiento de gases eficaz y adecuado son muy altos. Esta es la razón principal de que la incineración de lodos sea bastante cara. La energía producida en el proceso de incineración se puede utilizar para el secado de los lodos deshidratados mecánicamente antes del proceso de incineración o se puede utilizar para la producción de electricidad. Actualmente, los procesos de incineración de lodos, están cada vez más centrado en la recuperación de energía en forma de calor (vapor) o electricidad (Guibelin. 2004).

4.3.5. Co-combustión.

Para utilizar las cualidades caloríficas de los lodos en el proceso de combustión es necesario primero secarlos ya que su alto contenido de humedad le resta poder calórico. Sin embargo, el método de co-combustión puede mejorar el proceso de manejo de los biosólidos. La co-combustión es el proceso mediante el cual se mezcla una cantidad de un combustible como el carbón mineral y un porcentaje de biosólido (Tabla 9), aumentando el poder calórico de la mezcla y reduciendo los lodos a cenizas. Este método ha sido usado en plantas generadoras de electricidad con carbón en Alemania por más de diez años (Cartmel et al. 2006). Varios estudios han demostrado que la co-combustion puede ser viable desde los puntos de vista energéticos, económicos y ambientales, sobre todo cuando se lleva a cabo en las infraestructuras existentes (Werther y Ogada, 1999; Folgueras et al. 2003, Yao y Naruse, 2005; Stasta et al, 2006). Además, un porcentaje de hasta el 50% de los lodos urbanos secos pueden ser manejados junto con los combustibles de base sin mayores problemas técnicos desde el punto de vista de las emisiones a la atmósfera (Otero et al, 2002; Leckner et al, 2004).

Por otra parte, de acuerdo con la política energética europea, en primer lugar debe promoverse el uso de la biomasa y los residuos generados a nivel local como combustible, a fin de apoyar la economía del carbono. Los lodos tienen alto contenido de carbono, por lo que puede considerarse como un recurso y no como una pérdida, lo que ha limitado su valorización energética (Zheng y Kozinski, 2000; Enright, 2004).

Aunque la cinética del proceso de combustión es otra pieza importante de información, especialmente en la planificación de la co-combustión con carbón en infraestructuras existentes, esta no se estudia a menudo. Aun así, el análisis termogravimétrico ha demostrado ser una técnica que permite proporcionar una forma de evaluar rápidamente la cinética de la reacción inducida térmicamente, sin embargo ya que los lodos de aguas residuales y el carbón tienen orígenes muy diferentes, es necesario investigar cómo la adición de lodos altera la cinética de la combustión de carbón para cada caso concreto.

Tabla 9. Análisis inmediato, análisis elemental y poder calorífico de los lodos (SSL, SSV) y el carbón (C) usado en estudios de combustión. Modificado de Otero et al. 2008.

Muestra	Contenido de humedad %	Volátiles (b.d) %	Cenizas (b.d) %	C (b.d) %	H (b.d) %	N (b.d) %	S (b.d) %	O (b.d) %	HHV (b.d) Jg ⁻¹
C	1.2	10.6	17.7	73.5	3.2	1.6	2.2	1.8	28 870
SSL	4.3	58.0	31.2	38.2	4.3	4.5	0.9	20.9	17 606
SSV	3.9	42.8	53.8	22.7	3.3	3.1	1.6	15.5	9 480

Desde el punto de vista operacional, los porcentajes de lodo seco en las mezclas con el carbón para la co-combustión son generalmente inferiores al 10%. Sin embargo, se ha recomendado que no exceda el 5% de contenido de lodo seco (Werther y Ogada, 1999; Luts. Et al, 2000).

4.3.6. Pirólisis y gasificación.

En la actualidad, las áreas comercialmente explotadas en los métodos para la eliminación de los lodos, incluyen la incineración, disposición en los océanos y el uso como fertilizante. Estos son métodos de eliminación y como tales no proporcionan energía en su proceso de eliminación. La ceniza producida puede utilizarse también en aplicaciones seleccionadas. La gasificación tradicional implica la parcial combustión del material con el aire para que el material de hidrocarburo se transforme en monóxido de carbono, dióxido de carbono, hidrógeno y algunos compuestos de mayor peso molecular (Gasafi et al. 2008).

La pirólisis y la gasificación ofrecen nuevas oportunidades para la conversión de los lodos para proporcionar combustibles sin impacto ambiental. Ambas técnicas han sido investigadas por varios años (P.e.g. Clifford. 1999, Arai. 2002, Akiya et. al 2002, Schmieder et. al. 2000) y se estima que los lodos de aguas residuales tienen el potencial para utilizarse como fuente de energía. Si estos se procesan en los sistemas de gasificación o pirólisis, se puede reducir el volumen y fijar metales pesados en el residuo sólido, mientras que se produce aceite y gas de síntesis.

La pirólisis es la descomposición química con calor extremo en ausencia de oxígeno, que produce una materia sólida inerte y un combustible líquido, de características similares al petróleo crudo (Kim and Parker 2008). Para optimizar la producción de este combustible es necesario mantener las temperaturas alrededor de los 400°C. La mayoría de los materiales que componen la biomasa son degradados entre los 250-500°C. El proceso es endotérmico por lo que requiere un aporte energético.

En el proceso de pirolisis se suelen diferenciar tres etapas. En la primera, a temperaturas menores a 150-200°C, se produce la eliminación de agua y materiales más volátiles. En la segunda etapa, a temperaturas entre 300-500°C, tiene lugar la descomposición primaria de los componentes no volátiles. Como consecuencia, estos compuestos se fragmentan en otros de menor peso molecular y mayor volatilidad. Además, se originan reacciones secundarias que forman compuestos orgánicos de elevado peso molecular (alquitranes) y un residuo carbonoso que lleva incorporada la fracción inorgánica (cenizas) del residuo. A temperaturas más elevadas (>700- 800°C) el residuo carbonoso sufre un proceso continuo de degradación térmica, carbonización y eliminación de elementos volátiles (Andrés. 2010).

Para la pirólisis de lodos de plantas de tratamiento se suele trabajar a temperaturas entre 600-800°C con el fin de conseguir una cinética global del proceso favorable (Petersen y Werther, 2005; Sánchez y col., 2007).

Los productos generados dependen, en gran medida, de la naturaleza del material pirolizado, aunque también de las condiciones de reacción (temperatura, velocidad de calentamiento, presión, gas de purga, reacciones secundarias) (Bridgwater, 2003). En general, los productos derivados de la pirolisis de biomasa se suelen dividir en gases (productos volátiles no condensables), aceites (productos volátiles condensables) y sólidos (fracción carbonosa y cenizas). Si el proceso se realiza a bajas temperaturas se favorece la formación de sólidos (carbón) y se reduce la proporción de aceites. Por el contrario, la pirolisis a altas temperaturas favorece la producción de gases.

La primera planta comercial de pirólisis; fue construida en Western Australia (Bridle and Skrypski-Mantele 2004). Actualmente, esta planta ha sido descontinuada debido a que el producto obtenido está fuera de mercado por costos poco competitivos (Rulkens. 2008).

La gasificación supone la oxidación parcial de un sustrato carbonoso en condiciones sub-estequiométricas de aire, oxígeno o en presencia de otros agentes gasificantes como el dióxido de carbono o el vapor de agua (Dogru y col., 2005). Esta reacción genera una mezcla de gases que recibe el nombre de gas de síntesis o gasógeno, en función de su composición y del sistema de reacción empleado. El gas de síntesis contiene concentraciones variables de CO, H₂, metano, dióxido de carbono, nitrógeno, así como de otros hidrocarburos ligeros. Trabajos como los de Werther y Ogada, (1999); Elías, (2005); Knoef, (2005) y Fytily y Zabaniotou (2008) contienen información sobre la gasificación de lodos de depuradora.

La gasificación de vapor de alta temperatura es una de las tecnologías más prometedoras, viable, eficaz y eficiente para la conversión limpia de los residuos a energía con un impacto ambiental mínimo. La gasificación puede añadir valor mediante la transformación de los residuos a combustibles de bajo o medio poder calorífico que se puede utilizar como un fuente de energía limpia o se pueden usar conjuntamente con otros combustibles en los sistemas de energía actuales como la co-combustión (Nipattummakul et al. 2010).

Los rendimientos obtenidos y las características de los gases dependen, principalmente, de las condiciones de reacción (temperatura, presión, agente gasificante, tiempo de reacción), del tipo de reactor empleado (lecho fijo updraft y downdraft, lecho fluido, arrastre de gas) y de la aplicación de distintos sistemas de tratamiento de los gases (water-gas shift), craqueo catalítico de alquitrans (Andrés. 2010).

En función de su composición, poder calorífico y presencia de contaminantes (alquitrans, azufre, cenizas), los gases pueden emplearse como combustibles en turbinas, motores de combustión interna o calderas. El empleo del gas de síntesis para la producción de metanol, amoníaco y combustibles líquidos es bien conocido. En la

actualidad, existe un creciente interés por aumentar la proporción de hidrógeno y reducir la presencia de monóxido de carbono (Gasafi et. al. 2008).

4.3.7. Materiales para construcción

Otra forma beneficiosa para utilizar tanto los compuestos inorgánicos y orgánicos de los lodos es su uso en la producción de cemento Portland (Suzawa. 1999). En este proceso, ya sea la ceniza o el lodo seco pueden ser utilizados. Y debido a las altas temperaturas del proceso, los tóxicos orgánicos se oxidan completamente y los metales pesados son inmovilizados en el cemento.

En la actualidad, la cantidad de lodos utilizados para este propósito es más del 20% del total de lodos generados en Japón para el año 2000 (Taruya et al 2002).

En el caso de Japón, la sociedad tenía grandes preocupaciones sobre la contaminación del suelo por metales pesados, habiendo experimentado la pérdida de muchas vidas humanas causadas por el mercurio en Minamata y por cadmio (Itai Itai) en la década de 1960. En consecuencia la aplicación sobre el terreno no se ha hecho de forma generalizada. La composta a partir de lodos representa solo un cuarto de la tasa total de reciclado (15% de los lodos de aguas residuales en total) (Taruya et al 2002).

A causa de gran volumen, los lodos generados en las grandes ciudades del Japón se incineran. Así las cenizas resultantes o escoria se utilizan como relleno para las obras de ingeniería civil, materia prima de ladrillos y tejas, entre otras (Taruya et al 2002). El punto de partida en este proceso de producción son cenizas de incineradores, obtenidas después de la combustión de los lodos.

Para determinar si la ceniza es elegible para un uso benéfico es necesario analizar si cumple con las características físicas y químicas, además de confirmar que su nivel de contaminantes no representa riesgo para la salud (Ferreira et al. 2003). En el caso de Alemania, los requerimientos límite de concentración para el uso en el cemento de algunos metales pesados y de fósforo en ppm son: Cd<10, Cr<900, Cu<800, Hg<8, Ni<200, Pb<900, Zn<2500; P₂O₅<25% (Cenni et al 2000).

En una planta moderna de cemento Portland se trabaja generalmente con tres procesos (Figura 12), que son: 1) el proceso con las materias primas como la piedra caliza, arcilla, arena de sílice, y mineral de hierro que se envían a la molienda, 2) el proceso de incineración donde la materia prima se mezcla con el lodo y se procesa aproximadamente a 1450 °C en un horno a base de carbón para producir el “Clinker”, un producto intermedio, y 3) el proceso de acabado donde se muele una mezcla de clinker-yeso para convertirse en el cemento Portland.

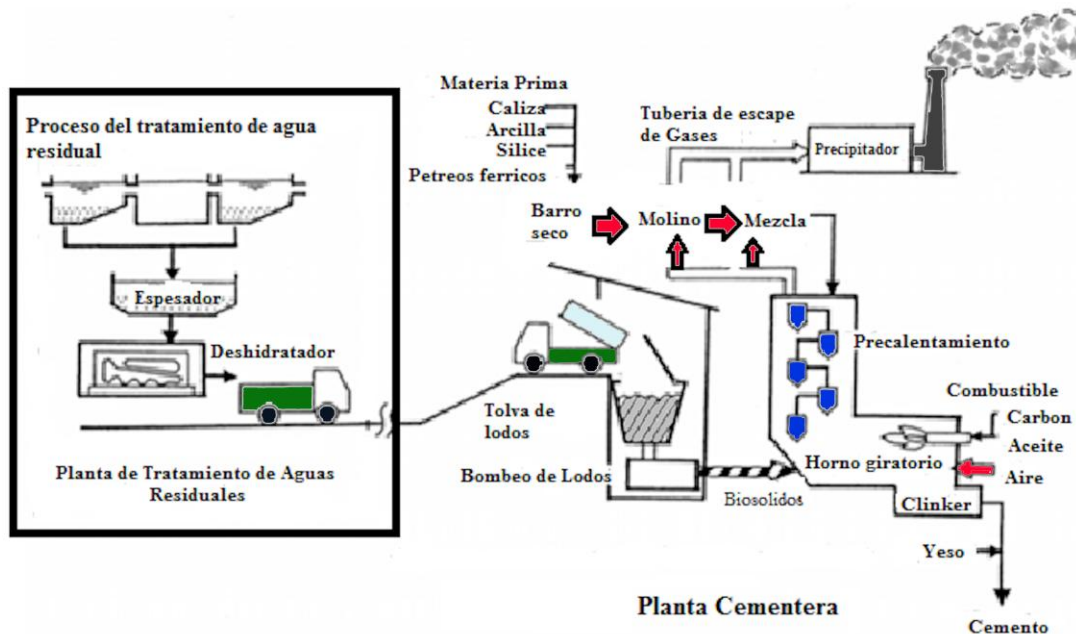


Figura 12. Esquema de proceso en una planta de cemento Portland. Modificada de Taruya et al; 2002.

4.3.8. Oxidación con agua en estado súper crítico (SCWO).

Mediante este proceso se oxida la materia orgánica a alta temperatura y presión. Las condiciones del agua se llevan hasta un punto crítico de alrededor de 374°C y 221 bars de presión. En este proceso, las sales y los metales disueltos se precipitan y como resultado obtenemos CO₂, H₂O, y N₂, sin la formación de SO_x y/o NO_x. En los efluentes del sistema de reciclaje se puede recuperar dióxido de carbono de alta pureza y en las cenizas obtenidas del proceso puede recuperarse el fósforo.

Sin embargo, un problema con esta tecnología es el alto costo de mantenimiento, debido a la corrosión producida por el alto contenido de sales que afecta al sistema. Dos unidades de SCWO instaladas en Texas, USA, en 2005, que procesaban diez toneladas diarias de biosólidos (con una inversión inicial de ocho millones de dólares) dejaron de operar debido a los altos niveles de corrosión. La viabilidad comercial del sistema dependerá del manejo y control de la corrosión (Marrone et al. 2004).

La oxidación supercrítica del agua es un excelente medio de reacción para la oxidación de diversos flujos de residuos, especialmente residuos acuosos que están demasiado diluidas para la incineración eficiente. Por encima del punto crítico (T= 374° C y P= 22.1MPa), las propiedades del agua cambian de modo que actúa como un

disolvente no polar. Muchos compuestos orgánicos y gases ligeros (por ejemplo oxígeno) son muy solubles en el agua supercrítica.

La baja viscosidad del agua supercrítica da una alta difusividad para los reactantes y por lo tanto una reacción rápida y completa. De los 450 a 700 °C, aproximadamente, que es la mitad de la temperatura de incineración convencional, los compuestos orgánicos son rápidamente (0.1 a 100 s) y eficientemente (99.9 %) oxidados, principalmente en dióxido de carbono, agua y nitrógeno (Tester et al. de 1993, Modell et al. de 1994, Gidner y Stenmark 2001, Griffith y Ray Mond-2002). Estos atributos hacen que la SCWO, sea atractiva para el tratamiento de los residuos orgánicos, en particular, los residuos de alta contenido de agua, tales como lodos. Los lodos normalmente tienen relativamente bajas concentraciones de sales, dando pequeños problemas de corrosión en comparación con otros desechos acuosos (Svanstrom et al. 2005).

Esta tecnología está en fase de desarrollo y consigue la destrucción completa de patógenos permitiendo realizar un control adecuado de los metales pesados y del olor. Hay una planta de demostración en Apeldoorn (Holanda) que emplea el sistema VerTech System para el tratamiento de 240 t de lodo/día. Como principales ventajas de la oxidación húmeda cabe mencionar que requiere pequeñas superficies, su operación es relativamente sencilla, no requiere del secado previo del lodo y no produce NOx, SOx, partículas ni metales pesados volátiles, como es el caso de otros procesos térmicos.

Como limitaciones o inconvenientes, es el hecho de que el medio de reacción es corrosivo y que la deposición de sales y el contenido inorgánico de los lodos bloquea los equipos (Dorado, 2007) obligando a parar y a realizar la limpieza del sistema. Además, produce un efluente líquido que es necesario tratar (Andrés. 2010).

En la figura 13 se muestra un esquema general del proceso de Oxidación supercrítica del agua.

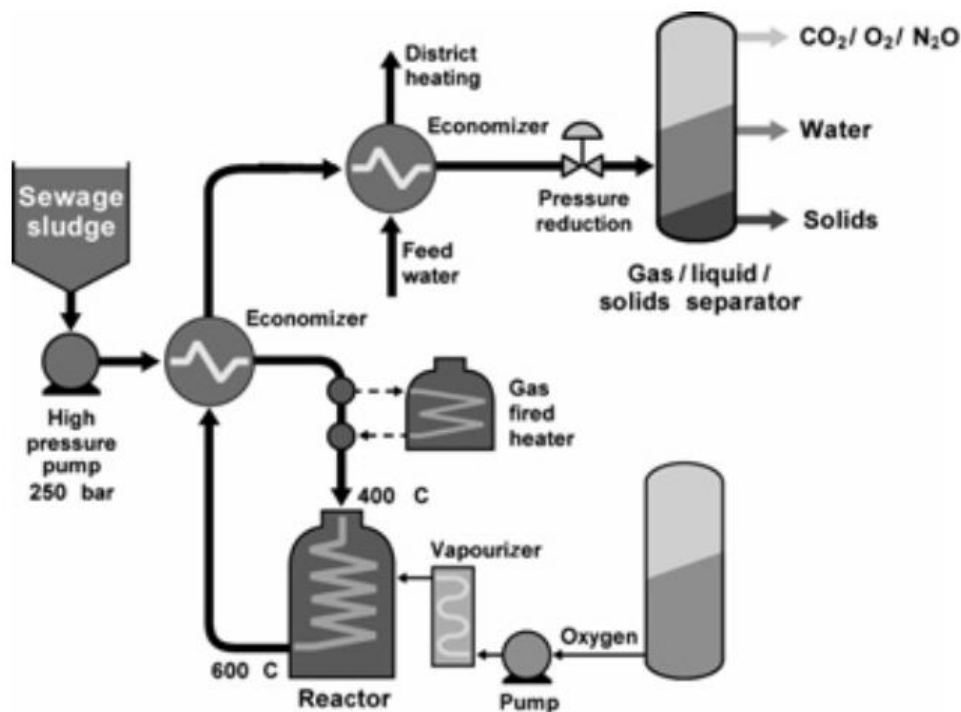


Figura 13. Proceso de la SCWO. Tomada de Svanstrom et al. 2005.

Otra tecnología encaminada a obtener un combustible a partir de los lodos residuales es la gasificación en estado supercrítico del agua (SCWG). El hidrógeno es un combustible de alta calidad que a diferencia de los combustibles utilizados actualmente, está libre de carbono, como resultado, no hay dióxido de carbono que se libere durante la combustión. Las tecnologías empleadas actualmente para la producción de hidrógeno se basan principalmente en el uso de combustibles fósiles en bruto (gas natural, petróleo crudo, carbón). El proceso más común para la producción de hidrógeno es la reacción a partir del gas natural (Momirlan et al 2002).

Aunque la producción de hidrógeno por reacción con gas natural es el método más barato disponible en la actualidad (Dunn. 2002), es indispensable buscar alternativas como la gasificación en estado supercrítico del agua (SCWG) que es una de las tecnologías encaminadas a la generación de combustible de hidrógeno y, al mismo tiempo la eliminación del lodo residual (Gasafi et al. 2008).

4.3.9. Tratamiento hidrotérmico

El tratamiento hidrotérmico (o hidrólisis térmica) es un proceso en el cual el lodo se calienta en una fase acuosa a temperaturas que varían aproximadamente entre 120 y 400 °C. El proceso de tratamiento hidrotérmico pretende desintegrar el lodo dando como resultado la formación y acumulación de productos disueltos. Esto hace que sea posible recuperar y reciclar los recursos útiles a partir de los lodos, tales como ácidos grasos volátiles, compuestos de fósforo, compuestos orgánicos para la mejora de la producción anaeróbica de biogás, y coagulantes (Hansen et al. 2000). Existen varias modificaciones del proceso dependiendo del resultado que se pretenda obtener, una modificación es la hidrólisis a una temperatura de 200-400 °C (sub-o supercrítico).

Los resultados obtenidos en laboratorio muestran reducciones significativas en la demanda química de oxígeno soluble (DQO) y ácidos grasos volátiles para lodos con una DQO inicial de aproximadamente 20 g/l, y concentraciones máximas de los ácidos grasos volátiles de aproximadamente 4 g/l (como DQO) a temperaturas moderadas de tratamiento por debajo de 200 ° C. También se observó que el uso de un oxidante, tal como peróxido de hidrógeno, puede tener un efecto positivo sobre la producción de ácidos grasos volátiles, dependiendo de la temperatura de tratamiento, el tiempo de tratamiento, el tipo de lodo, y la cantidad de oxidante (Rulkens. 2008).

El calor utilizado para aumentar la temperatura del lodo puede ser fácilmente recuperado y reutilizado mediante intercambiadores de calor. Sin embargo, no está claro lo que ocurre con los tóxicos, especialmente los compuestos orgánicos tóxicos. Rulkens (2008) sugiere que para resolver el problema de lodos por completo, será necesario un post-tratamiento intensivo.

4.3.10. Recuperación de fósforo

Como ya se ha mencionado, uno de los elementos más valioso en los biosólidos es el fósforo, ya que su existencia como producto de fertilización mineral es limitada. Se estima que las reservas conocidas de fósforo posiblemente duren aproximadamente cien años con las tasas actuales de utilización (Sims and Sharpley 2005).

Desde el punto de vista económico, el mejor uso del fósforo de los biosólidos es la aplicación directa en suelos agrícolas; sin embargo, en este punto particular, la mejor tecnología disponible actualmente para reutilizar el fósforo de los biosólidos es la ceniza proveniente del proceso de oxidación con agua en estado súper crítico SCWO por sus siglas en inglés (Svanström et al. 2007).

5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

El estudio incluye el análisis y factibilidad de las diferentes tecnologías para el reuso y tratamiento de lodos residuales. En la tabla 10 se muestra una comparación de montos de inversión inicial en implementación de tecnologías que se han venido desarrollando últimamente a nivel mundial, y que son atractivas desde el punto de vista medio ambiental y tecnológico. Estas estimaciones económicas están basadas en la bibliografía consultada y son las tecnologías de reducción y reuso mencionadas en el capítulo 4 de marco referencial y que se analizaron y discutieron en los apartados anteriores (4.1 a 4.3)

De este modo, las alternativas del reuso de los lodos como fuente de energía, tales como la incineración, la co-combustión, la recuperación de fósforo a partir de la oxidación con agua en estado super crítico o la pirólisis para obtener combustibles líquidos similares al petróleo, son actualmente poco factibles. Esto debido a que tal como se muestra en la tabla 10 estas tecnologías requieren de grandes inversiones de recursos financieros y científicos, lo que en el caso de México, y particularmente en el caso de Mexicali, no las hace viable en el corto o mediano plazo.

Debido a que la PTAR de la Central Eléctrica “La Rosita” se encuentra ubicada en el Valle de Mexicali, región con una producción agrícola muy importante, es factible el reuso de sus lodos en el sector agrícola. Lo anterior facilitaría y economizaría el manejo y transporte de las aproximadamente 14,000 toneladas de lodo residual generadas anualmente. Por otro lado, la reutilización de los lodos evita disponerlos como un residuo, lo que es otro beneficio implícito (Bravo 1999). Con el reuso de estos desechos que cuentan con un alto potencial de aprovechamiento, la PTAR evitará en gran medida los costos por confinamiento por lo tanto el ahorro es una consideración importante que trae consigo la revalorización de este residuo.

Tabla 10. Monto de la inversión inicial de algunas de las opciones seleccionadas según bibliografía revisada. Los costos están indicados en USD.

Análisis de costos por diferentes opciones	Tecnología	Pirolisis	SCWO	Disposición de lodos en suelo agrícola	Incineración
	Costo Inicial	\$3,250,000.00	\$10,000,000.00	Ver Tabla 12	\$53,000,000.00
	Mantenimiento	Valor elevado	Valor elevado	Ver tablas 9,10 y 11	80 dls por tonelada tratada
	Status	En operación	Fuera de servicio	En operación.	En operación
	Observaciones	2 ton/hora	Por corrosión	Amplia zona agrícola en la region	90,000.00 ton por año.
	Referencias	Technological options for de management of biosolids	www.bio-oil-holding.edu (Harlingen Water in Texas).		www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd61/tecnadmvo/cap5.pdf

5.1. Análisis del uso Agrícola

El uso de lodos residuales como mejoradores biorgánicos de suelos agrícolas se presenta como una alternativa conveniente para su disposición debido a que permite el aprovechamiento de un recurso de bajo precio que mejora la relación costo-beneficio. Además, la aplicación de biosólidos favorece algunas propiedades físico-químicas del suelo, debido al aporte de materia orgánica, mejorando la porosidad, permeabilidad y retención hídrica del suelo. En el caso de los tipos de suelos predominantes en el valle de

Mexicali encontramos los llamados yérmoles y xerosoles, característicos de zonas áridas y semiáridas, pobres en materia orgánica, por lo que al adicionar los biosólidos, esperaríamos mejorar las propiedades del suelo.

Por otro lado, como ya se ha mencionado, la aplicación de biosólidos en suelos agrícolas puede producir efectos negativos en el suelo, agua y/o aire, si no se practica correctamente. En general, una buena gestión en la aplicación de biosólidos es preferible sobre el uso de fertilizantes convencionales por las siguientes razones:

- Los biosólidos son un producto reciclado, su uso no agota recursos no renovables.
- Los nutrientes en los biosólidos no son tan solubles como en los fertilizantes químicos.
- La materia orgánica en los biosólidos mejora las propiedades del suelo para el crecimiento óptimo de los cultivos, incluyendo la fertilidad y la capacidad de retención del agua; además de disminuir la necesidad de uso de plaguicidas y de labores agrícolas (EPA. 2002).

Los criterios para el uso agrícola de lodos de aguas residuales suelen ser basados en el contenido de nitrógeno (EPA, 1994), por dos razones: (a) Es uno de los tres macronutrientes principales, junto con el fósforo (P) y el potasio (K), necesarios para aumentar la producción de cultivos; (b) tiene una mayor biodisponibilidad.

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, ha señalado que existen claras diferencias con respecto al proceso de mineralización, que es en general la conversión del nitrógeno orgánico en nitrógeno mineral (fundamentalmente nitratos y amonio), dependiendo del tipo de estabilización utilizada para el lodo. Por ejemplo, para el lodo anaeróbico, la proporción de nitrógeno total disponible en el primer año, segundo y tercero es de 20%, 10% y 15%, respectivamente. Si la estabilización se logra mediante el compostaje, las cifras son 10%, 5% y el 2,5%, respectivamente, aunque estos datos se deben ajustar para diferentes entornos geográficos (EPA, 1994).

Mediante análisis químicos se puede establecer la capacidad del lodo residual para su posible reutilización. La concentración de nitrógeno, fósforo y potasio, así como su contenido orgánico, el grado de digestión al cual ha sido sometido y la materia orgánica digerible son parámetros que definen su potencial como fertilizante.

La revisión de la literatura existente permite establecer que, en el presente, lo más común es aprovechar los beneficios de los biosólidos en el área agrícola, debido a las cualidades intrínsecamente ligadas a su naturaleza como fertilizante. Además, en los países desarrollados es una opción socialmente aceptada, siempre y cuando haya tierra

disponible para ello y se cumpla con los requerimientos de manejo y estabilización estipuladas por las autoridades de cada país según sea el caso.

Debido a la presencia de una amplia zona agrícola en la región, a los beneficios nutricionales y de mejoramiento de suelo que los lodos representan, y al relativo bajo costo de operación y mantenimiento, este método de disposición ha sido seleccionado como la opción que será propuesta para el manejo de los lodos de la PTAR.

5.1.1. Opciones de cultivo viables para el valle de Mexicali

Si tomamos en cuenta las directivas de la Comunidad Europea, así como las condiciones de la EPA de restringir el uso de biosólidos en cultivos de consumo directo (hortalizas, árboles frutales), la mejor opción para el uso de los lodos de la PTAR-La Rosita es su aplicación como fertilizantes en suelos con cultivos de cereales tales como el trigo, el maíz y la avena.

Los principales cultivos que se siembran en el Valle de Mexicali son el trigo, algodón, forrajes, alfalfa, hortalizas, cebolla (aunque es una hortaliza por su volumen de producción se reporta individual), además de cultivos de invernadero como tomate, pepino y chile (Tabla 11).

Tabla 11. Principales productos agrícolas en el valle de Mexicali, año 2009 (SEFOA 2009).

Cultivo	Superficie en Hectareas (Ha)
Trigo	89,032
Algodon	19,719
Alfalfa	29,907
Cebolla	3,587
Hortalizas	6,748

Después de comparar los resultados de los análisis de los lodos de la PTAR la Rosita con la “NOM-004-SEMARNAT-2002”, y de acuerdo con los parámetros descritos en la norma, los biosólidos generados en la PTAR “La Rosita pueden ser aprovechados en usos agrícolas. El Valle de Mexicali tiene una importante producción agrícola, por ejemplo, se sitúa como el segundo lugar nacional en producción de trigo en el 2010 con el 17 % del total nacional (INEGI 2010), por lo que el uso de los lodos en este sector es recomendable. Además, la cercanía a las zonas agrícolas, asegura la factibilidad económica para el manejo y traslado de las 14,000 ton. de lodo residual. Esta alternativa de reuso permitiría la sustitución del fertilizante químico, que comúnmente se utilizan en

el Valle de Mexicali, por fertilizantes orgánicos aportados por los lodos; menos agresivo al medio ambiente (Lavado y Taboada 2002). Asimismo, al utilizar el lodo residual para fertilizar cultivos se está generando un ahorro económico para el agricultor al evitar la compra de fertilizante convencional. Por otro lado, la minimización del residuo mismo es otro beneficio implícito, ya que al reusar el lodo residual en suelos agrícolas se está evitando disponerlo como un residuo (Bravo, 1999).

Para determinar la dosis de aplicación de biósólido apropiada para un cultivo es necesario conocer las siguientes variables (Lavado y Taboada 2002):

- Valor fertilizante del biosólido.
- Tipo de cultivo y necesidades en nutrientes esenciales.
- Requerimientos de nutrientes del suelo a sembrar
- Niveles de contaminantes en los lodos residuales
- Características de los suelos receptores.

Así, al intentar usar el biosólido proveniente de la Termoeléctrica (14,000 ton/año) como fertilizante agrícola en cultivos del Valle de Mexicali, se consideraron los principales cultivos en el valle (Figura 14). De este modo, se eligió el cultivo del trigo debido a ciertas consideraciones:

- Cultivo de mayor extensión en el valle ya que ocupa alrededor de 89,032 Ha. (60% del terreno cultivable).
- Como consecuencia de su extensión, el trigo representa uno de los principales ingresos económicos en el Valle de Mexicali.
- La fertilización abarca entre el 20% y el 50% de los costos de producción de trigo.
- Los nutrientes que componen los biosólidos (Nitrógeno, Calcio, Magnesio, Potasio, Fósforo y Azufre) forman parte de los nutrientes necesarios en la fertilización del trigo, por lo tanto se aportarían los nutrientes necesarios al cultivo.

El reuso de biosólidos en el cultivo de trigo es recomendable debido, entre otras razones a que la fuente generadora se encuentra ubicada en las inmediaciones del Valle de Mexicali, situación que facilita el transporte de 14,000 toneladas anuales de biosólidos provenientes de la PTAR de la Central Eléctrica “La Rosita” hacia las tierras de cultivo.

Con el reuso de estos desechos que cuentan con un alto potencial de aprovechamiento, la PTAR evitará, en gran medida, los costos por confinamiento. Por lo tanto, el ahorro es una consideración importante que trae consigo la revalorización de este residuo.

Otra ventaja es el ahorro de fertilizante químico que se aplica actualmente en la siembra de trigo. Aunque no se estaría sustituyendo en su totalidad la fertilización química, si se esperarían ahorros de entre el 30 y 50 % por este concepto para los agricultores, para el tercer año de aplicación.

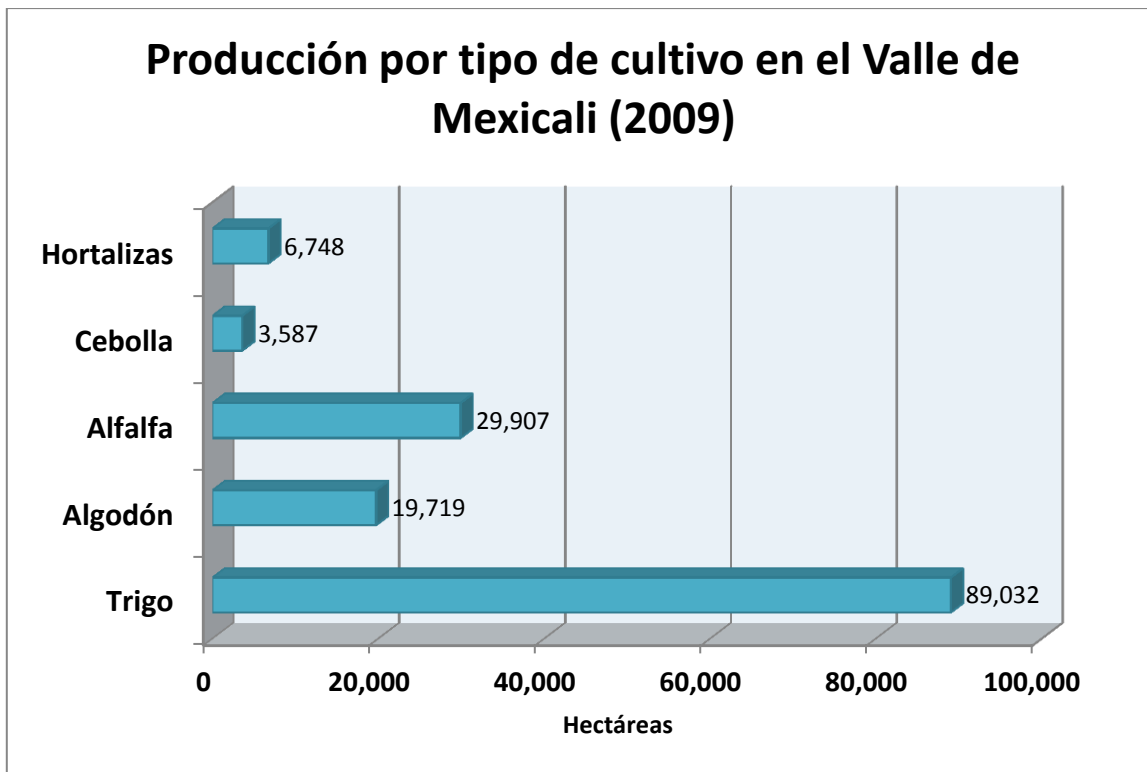


Figura 14. Estadística Principales cultivos en el Valle de Mexicali (Sefoa, 2009).

La tendencia mundial para el reuso de los lodos como abono agrícola, implica primeramente estabilizarlos mediante un proceso de secado, lo que permite reducir significativamente, la posibilidad de contaminación por patógenos (e.g. Martin del Campo et al. 2002, Lavado y Taboada, 2002, Marambio et al. 2003, Salcedo et al. 2007, Stuczynski, y.Compton 2001, Wang et al. 2008). En este contexto, se realizó una revisión de los equipos que se utilizan para el secado. En este punto, proponemos utilizar al sol como fuente de energía para el secado de los lodos, pensando en aprovechar las condiciones climáticas del valle de Mexicali, que se caracteriza por la alta incidencia de rayos solares, y por temperaturas que alcanzan los 50° en el verano. Estas condiciones de verano a su vez coinciden con el pico de producción de lodos en la planta termoeléctrica. Debido a lo anterior se eligieron dos formas de manejo, las cuales se esquematizan en la figura 15; y son: (1). Aplicación directa de lodos; ya que de acuerdo con los parámetros descritos en la NOM-004-2002, los biosólidos generados en la PTAR, se clasifican en clase C (tabla 6), por lo que pueden ser aprovechados en usos agrícolas, y en el caso del trigo una disponibilidad de más de 89,000 Ha cultivables; y (2). Secado de lodos para la elaboración de composta, considerando las características climatológicas de la región, como lo son la alta incidencia solar y las altas temperaturas. En los apartados siguientes se desarrollan ambas opciones.

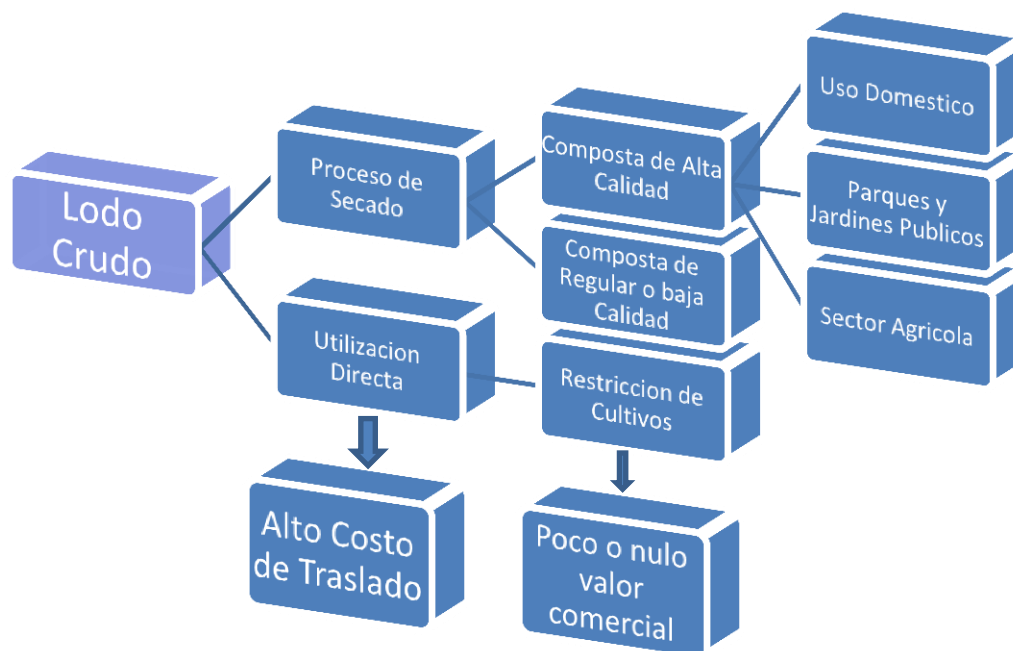


Figura 15. Esquema del reuso de lodos residuales

5.1.2. Aplicación directa de lodos.

Como se mencionó anteriormente los biosólidos generados en la PTAR” La Rosita”, pueden ser aprovechados en usos agrícolas. Esta alternativa de reuso permitiría el aprovechamiento de un recurso con características benéficas para los cultivos a bajo costo.

El trigo es el principal cultivo del Valle de Mexicali y el concepto de fertilización, alcanza el 50% de su costo de producción (tabla 12). Aunque, como lo dicen diversos investigadores (e.g. Tapia 2003; Martín del Campo et al. 2002, Ortiz et al. 1999, Andrade 2002), el uso de los lodos no estaría sustituyendo en su totalidad la fertilización química en el primer año, si se esperarían ahorros mayores por este concepto a partir del segundo y tercer año; además de un incremento en la productividad.

Tabla 12. Costos de cultivo de trigo por hectárea en USD.

INIFAP -SAGARPA (DRR002)-AGRICULTURA (SFA)	
ESTIMACIÓN DE COSTO DE CULTIVO DE LA LÍNEA DE TRIGO CICLO O.I.2009-2010	
Labores de maqunaria y equipo agrícola a costo de maquila	Costo
I.- Preparacion del suelo	\$ 180.32
II.- Siembra o plantacion	\$ 117.50
III.- Fertilizacion	\$ 321.00
IV.- Riego y drenaje	\$ 132.65
V.- Control de plagas	\$ 130.00
VI.- Cosecha	\$ 119.35
VII.- Diversos	\$ 221.80
Total labores:	\$ 1,222.62

Para evaluar el aprovechamiento de los lodos como mejorador de suelos y fertilizante, se procedió a seleccionar el área potencial de uso de los lodos, que se limitó en este caso al área de reserva que tiene la PTAR, dentro de sus terrenos, para este efecto se hizo una malla con 10 puntos en una superficie de 6.6 hectáreas (Figura 16), donde se caracterizó el suelo tomando en cuenta el pH (tabla 14) y el contenido de humedad (tabla 13), posteriormente se analizó el lodo residual, según la Norma Oficial Mexicana, NOM-021-RECNAT-2000, para obtener su pH, y su contenido de humedad.

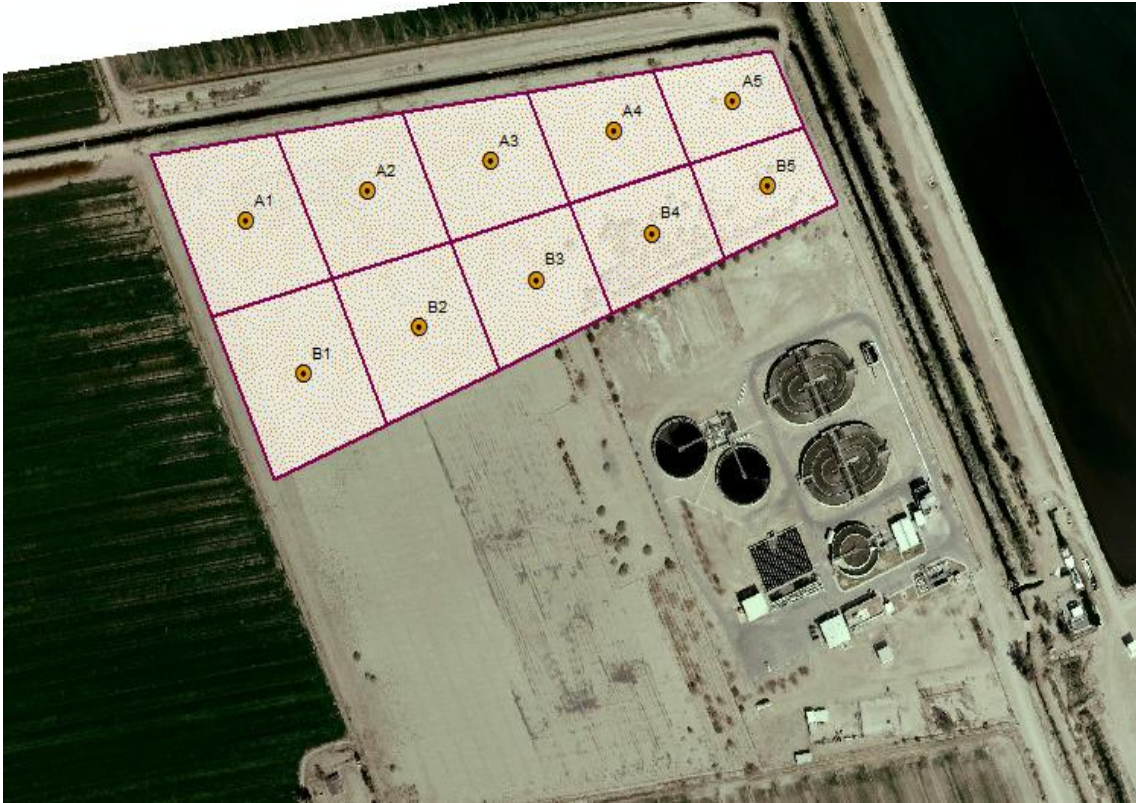


Figura 16. Patios de la PTAR “La Rosita” y zona de muestreo

Tabla 13. Porcentaje de Humedad de los lodos de la Rosita, metodología según la NOM-021-SEMARNAT-2000.

Muestra	Porcentaje Humedad
1	85.42
2	84.93
3	85.00
4	85.32
5	85.04
6	91.71

Tabla 14. Resultados del pH de los suelos en los puntos de la malla de muestreo.

Punto de Muestreo	Área (m ²)	pH
A1	8476	8.1
A2	7551	8.2
A3	6614	8.2
A4	5682	8.2
A5	4552	8
B1	8475	8.2
B2	7545	8.1
B3	6611	8.2
B4	5711	8.4
B5	4705	8.1

El área total de la zona propuesta para aplicación de los lodos dentro de los terrenos de la PTAR que se muestra en la tabla 14 es de 6.6 Ha, nos da la posibilidad de aplicar hasta 264 toneladas de lodos en dosis de 40 toneladas por hectárea según la bibliografía consultada. Los resultados del pH del suelo de la malla de muestreo, muestran un suelo ligeramente alcalino.

5.1.3. Proceso de secado para compostaje.

El proceso de compostaje de los residuos sólidos consiste en la descomposición o fermentación natural de la porción orgánica de los residuos, es decir, por la acción metabólica de los microorganismos presentes, en donde se reducen sus contenidos de patógenos (estabilización) dando origen a un producto denominado composta. Este es un producto orgánico estabilizado, cuyas propiedades lo hacen particularmente útil como mejorador de la estructura y textura de los suelos y, en menor grado, como fertilizante vegetal. En el proceso de compostaje son necesarias temperaturas altas para la destrucción de los organismos patógenos y las semillas de diversas plantas, con lo cual se obtiene una composta de mejor calidad. La temperatura óptima para la digestión aerobia varía entre 50 a 70°C, siendo probablemente los 60°C, la temperatura más satisfactoria (Kreith, 1994)

Para el secado de lodos y producción de composta se propone un secador tipo invernadero (Figura 17). El principio del dispositivo propuesto para secador, se basa en captar la energía radiante proveniente de los rayos solares, sobre un cuerpo opaco que en este caso sería el lodo que absorba dicha energía y la transforme en calor. Al calentarse el lodo, este emite energía hacia el medio que lo rodea (aire). En este proceso se necesita aislar el cuerpo y el aire que lo rodea para evitar que la energía se pierda al ambiente. Para esto se protege al cuerpo con un aislamiento térmico por el lado que no recibe la radiación solar. Por la parte superior y los laterales se utiliza un material transparente o translúcido, que permita al rayo solar ingresar, pero que no permita que el aire caliente se pierda. Está cubierta transparente de alta transmitancia permite el paso de las ondas ultravioleta (uv) y de luz visible, pero retienen y reflejan las ondas infrarrojas, que son las que emite el cuerpo opaco. Esto hace que un porcentaje de las ondas infrarrojas que inciden en la cubierta retornen al lodo, aumentando la captación de éste y contribuyendo al calentamiento del aire entre ambos. Este fenómeno se conoce como efecto invernadero (Figueroa 2003).

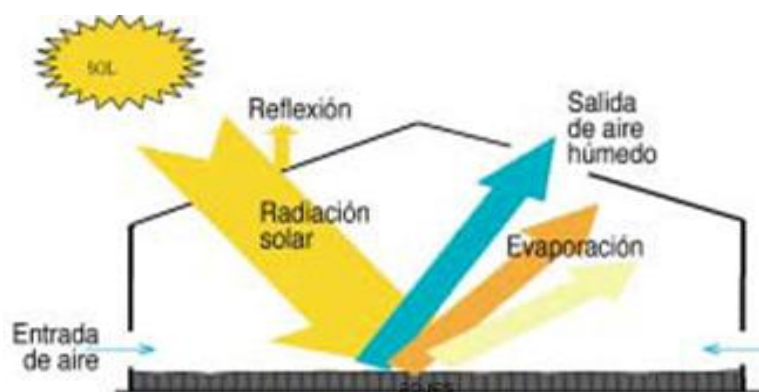


Figura 17. Esquema del secador tipo invernadero.

El secador propuesto es de 25 m² de área y profundidad de 80 cm, con movimiento mecánico, donde se estima un tiempo de residencia de 10 días con volumen de secado de 20 m³ y una producción aproximada de 3 toneladas de composta por secador. Para la simulación del fenómeno, definir los parámetros de diseño y la elección de materiales de construcción (Tabla 15), del prototipo de secado, mediante el uso de la energía solar, se realizó una simulación del fenómeno efecto invernadero con el software TRNSYS 16 (Thermal Energy System Specialists 2004), con la finalidad de observar si en la ciudad de Mexicali es viable alcanzar temperaturas de 60°C, que sería según Kreith, la temperatura óptima para el proceso de secado.

Tabla 15. Propiedades térmicas de los materiales propuestos para un secador tipo invernadero, en Mexicali B.C.

PROPIEDADES TÉRMICAS DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN								
Descripción	Espesor m	Conductividad térmica W/m°C	Conductividad térmica KJ/hmK	Densidad kg/m ³	Calor específico J/(kg°C)	Calor específico kJ/(kgK)	Resistencia térmica m ² C/W	Resistencia térmica hm ² K/kJ
MORTERO CEMENTO ARENA 1"	0.025	0.7222	2.600	1856	837	0.837	0.035	0.010
CONCRETO ARM. DENS. 2400 KG/M3***	0.1	1.6	5.760	2400	971	0.971	0.063	0.017
BLOCK DE CONCRETO DE 20 CM ESPESOR COLADO	0.203	0.5729	2.062	1424	837	0.837	0.174	0.048
ALUMINIO		204	734	2700		0		0.000

La opción de un desarrollo tecnológico para el secado de los lodos mediante la energía solar, permitiría la reducción del volumen de lodos generados, en aproximadamente un 80%, con la consecuente disminución en los costos del manejo y gestión de lodos, de la planta de tratamiento de aguas residuales de “La Rosita”. Además, la eliminación de patógenos, estabilizaría el producto y generaría composta de acuerdo a las normas mexicanas y estándares internacionales. De esta forma, el producto obtenido a partir de esta aplicación tecnológica, obtendría un valor económico y una reducción en el impacto ambiental y social al neutralizar a los patógenos y al evitar saturar los rellenos sanitarios, que son altamente costosos para los gobiernos. Aún más, se generaría un producto atractivo para los agricultores locales por su potencial como mejorador de suelos y el posible ahorro en fertilizantes minerales. La estabilización le da un factor de seguridad y un valor agregado al producto para la población en general, debido a la posibilidad de usar el producto en jardines públicos y privados, con seguridad en su manejo, sin descontar la posibilidad de comercialización.

Se realizaron una serie de corridas para establecer los materiales óptimos que permitieran alcanzar las temperaturas deseadas. Los resultados de la simulación fueron alentadores ya que con la geometría propuesta, utilizando block de concreto común de 20 cm de espesor, estructura metálica y vidrio sencillo como material de recubrimiento de la estructura, se alcanzaron hasta 60 ° C, que sería la temperatura óptima para el proceso de estabilización (fig.18).

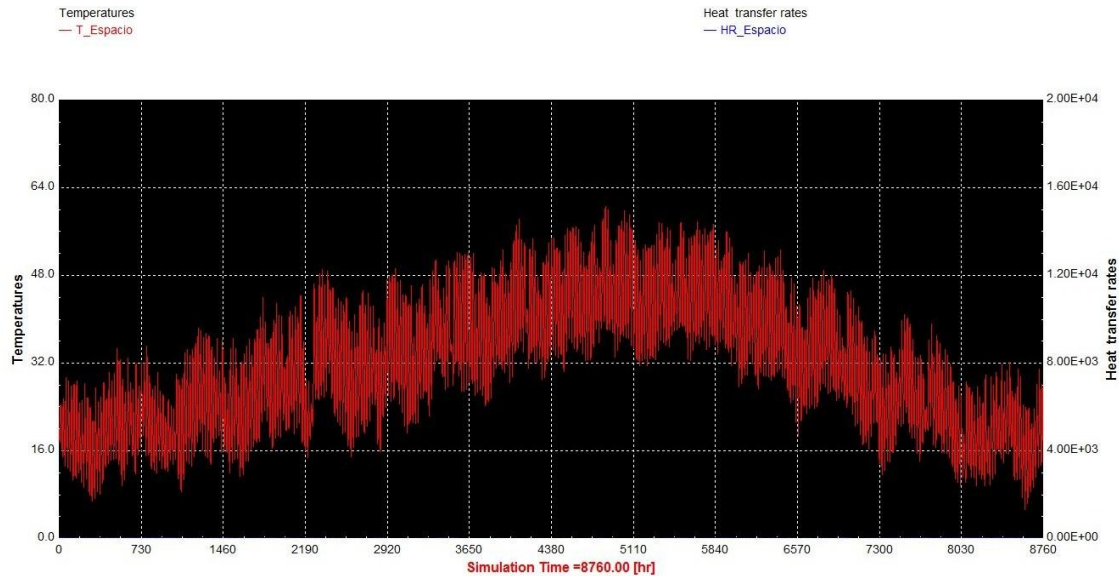


Figura 18. Corrida del simulador con vidrio sencillo, donde se nota que la temperatura maxima se alcanza en el mes de julio.

Los 60°C obtenidos mediante la simulación con vidrio sencillo solo se alcanzan durante los meses de junio y julio. El resto del año esa condición no se cumple bajo las condiciones propuestas por lo que se corrió una nueva simulación con cubierta doble. Se preparó una vez más el simulador ahora con un material de cubierta de doble vidrio, obteniendo un aumento significativo de la temperatura en la cámara de secado, alcanzando de abril a octubre condiciones deseables para el secado de los lodos (fig. 19), cumpliendo así los requerimientos de temperatura en el periodo de verano. Aunque los resultados mejoraron considerablemente al incluir un vidrio triple alcanzando más de 80 grados centígrados en el mismo periodo (fig. 20).

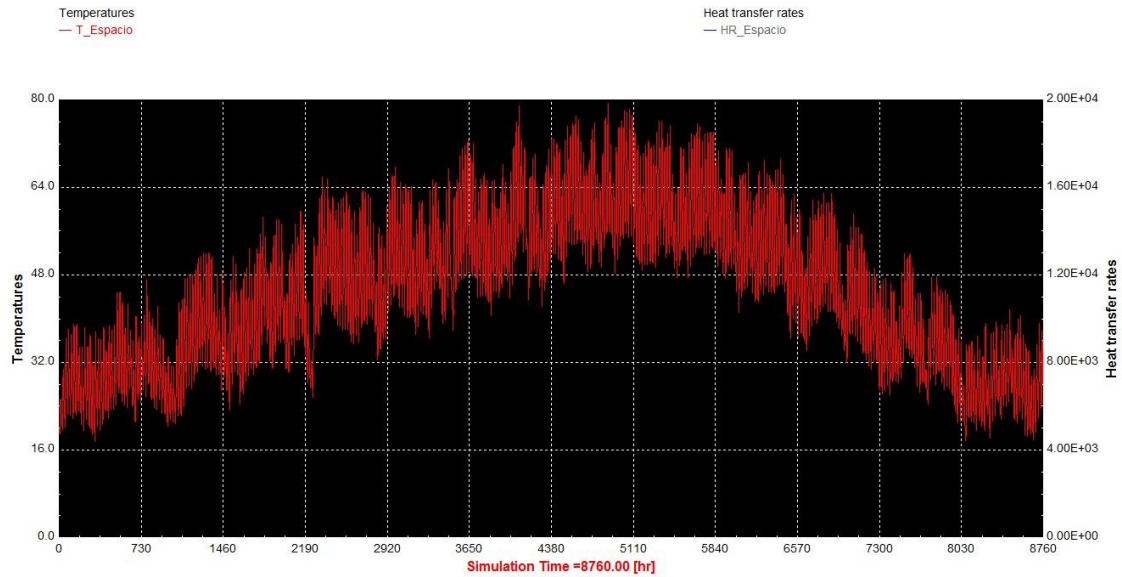


Figura 19. Corrida del simulador con vidrio doble.

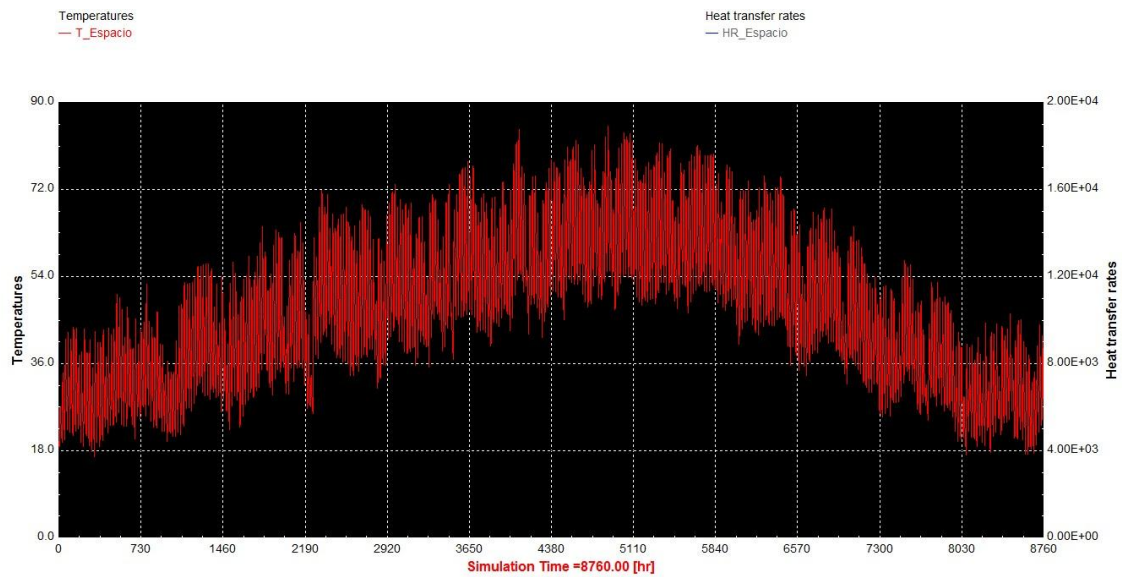


Figura 20. Corrida del simulador con vidrio triple.

Durante los meses de noviembre, diciembre, enero y febrero solo se alcanzan temperaturas máximas de 58° al utilizar un recubrimiento de vidrio triple, por lo que se deduce que en estos meses el periodo de residencia será mayor. Esto se puede considerar como un problema menor debido a que durante este periodo la planta tiene su nivel de

producción de lodos en el punto más bajo, ya que la demanda de electricidad en el periodo de noviembre a febrero es bastante menor que en el verano. Sin embargo otra opción viable es utilizar el lodo crudo durante esta temporada, en el área de los patios (fig. 16) de la PTAR, a fin de tener un plan de manejo mixto, que funciona de acuerdo a las condiciones climáticas de la zona.

Para efecto de mover el lodo dentro del secador, se sugiere un equipo multifuncional de la marca Bobcat (tabla 16), el que tiene la particularidad de ser compacto, con muy buena capacidad de carga y estar adaptado con el accesorio denominado “Carretilla” que ofrece la posibilidad de cargar hasta 2 toneladas por viaje. Este equipo se transporta mediante orugas, ya que así puede maniobrar encima de la cama de secado de lodos. Asimismo se propone adicionar para el Bobcat el accesorio denominado “Tiller”, que tiene como objetivo airear los lodos. Con este equipo toda la maniobra de cambio de accesorio, entre la carretilla y el tiller se hace desde cabina. De este modo desde la salida de los lodos del filtro banda hasta el proceso de homogenización del producto dentro del secador quedaría resuelto (fig. 21).

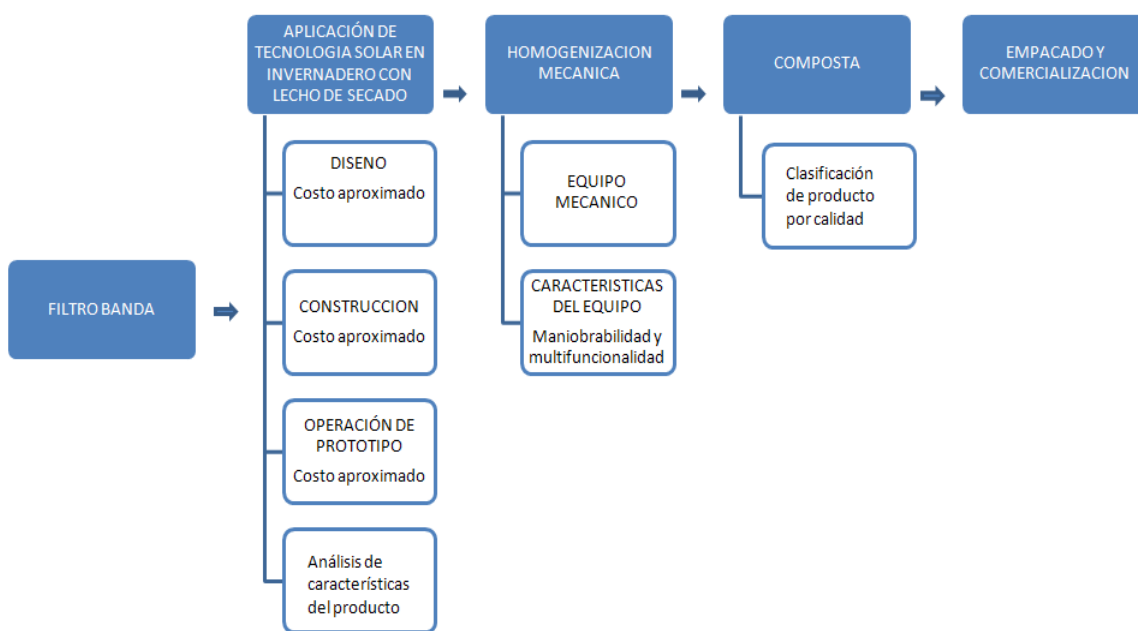


Figura 21. Esquema de los Pasos para generar composta.

Tabla 16. Descripción y costo aproximado del equipo y operación diaria en USD.

Equipo	Costo adquisición	Combustible (estimación por día)	Lubricantes (estimación por día)	Operador (costo aprox. por día)	Costo Total Operación (costo aprox. por día)
Bobcat Cultivador tiller	\$6,193.75				
Mini cargador Bobcat T630 Orugas	\$48,437.50	\$12.5	\$1.00	\$26.66	\$40.16
Carretilla Modelo 25	\$5,233.33				

6. Conclusiones

Las alternativas de reuso de los lodos como fuente de energía, la incineración, la co-combustión, el aprovechamiento de las cenizas de los lodos como materiales de construcción, la recuperación de fósforo a partir de la oxidación con agua en estado súper crítico o la pirólisis para obtener combustibles líquidos similares al petróleo, son actualmente poco probables. Esto debido a que estas alternativas de reuso y sus tecnologías requieren grandes inversiones de recursos financieros y científicos como se mostró en el análisis, lo que en el caso de México y particularmente en el caso de Mexicali, no lo hace viable en el corto o mediano plazo.

- En el análisis efectuado acerca de los usos de los lodos y las tecnologías que se utilizan para ese fin, se concluye que la opción más adecuada es el uso agrícola, debido al valor agregado que como mejorador del suelo y fertilizante tiene el biosólido.
- Otra de las ventajas para el posible reuso de los lodos en este sector, es que la PTAR está situada en una amplia zona de cultivos, por lo que la disposición de espacio no se constituye como una limitante además de ser económicamente factible debido al ahorro de recursos en su gestión y manejo.
- Se esperarían ahorros en el cultivo del trigo que es el principal del Valle de Mexicali y donde el concepto de fertilización, alcanza entre el 20% y 50%

de su costo de producción. Aunque con el uso de los lodos no se estaría sustituyendo en su totalidad la fertilización química en el primer año, se esperarían ahorros mayores por este concepto a partir del tercer año; además de un incremento en la productividad.

Se concluye que el uso agrícola mediante un proceso de estabilización del biosólido mediante la técnica de secado con el fin de asegurar la calidad y la seguridad en materia del control de patógenos es la mejor opción, debido a que:

- las condiciones prevalecientes en Mexicali son óptimas para desarrollar un prototipo tecnológico de secado de los lodos mediante la energía solar.
- que permitiría la reducción del volumen de lodos generados, con la consecuente disminución en los costos del manejo.
- la eliminación de patógenos, estabilizaría el producto y generaría composta
- El producto obtenido tendría un valor económico y sería atractivo para los agricultores locales por sus características de mejorador de suelos y para la población en general, debido a la posibilidad de usar la composta en jardinería urbana.
- El manejo del residuo en el secador no es la mejor opción para los meses de noviembre, diciembre, enero y febrero; por lo que se propone que para estos meses que tienen la menor cantidad de producción de lodos del año, se proceda a su aplicación directa en el área de patios (fig. 16) donde se podrían sembrar los cultivos permitidos como lo es el trigo, algodón etc. o también proponer su uso para mejorar el suelo de zonas sujetas a programas de forestación.

- El resultado positivo de la factibilidad del uso de los lodos residuales en el área agrícola, abre la posibilidad de continuar con esta investigación, donde se pretende probar los procedimientos y el rendimiento de la aplicación de lodos en el cultivo del trigo en el Valle de Mexicali, en aplicación directa con un contenido de humedad del 85%, para una fase experimental.

7. BIBLIOGRAFÍA

Adam, C., Kley, G. and Simon. F.G. (2007). Thermal treatment of municipal sludge aiming marketable P-fertilisers. Material Transactions. 48, 3056-3061.

AIDIS (Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental) 2003. Producción de lodos, opción factible para aguas servidas. Reporte.

Aelterman, P., Rabaey, K Pham, T.H., Boon, N. and Verstraete, W.(2006). Continuous electricity generation at high voltages and currents using stacked microbial fuel cells. Environmental Science and Technology 40, 3388-3394.

Andrade, M.A., Marcel, P. Reyzabal. M. L y Montero Ma. J. 2000. Contenido, evolución de nutrientes y productividad en un suelo tratado con lodos residuales urbanos. Edafología 7(3) 21-29.

Andres de Almeida J. Manuel 2010. Gasificación de lodos de estaciones depuradoras de aguas residuales urbanas (EDAR). Universidad Politécnica de Madrid. España. Tesis Doctoral 185 pag.

Anuario Estadístico Municipal de Mexicali edición 2003

ASHRAE (The American Society of Heating, Refrigerating & Air-Conditioning Engineers) Standards and technology 1997.

ASTM (American Society for Testing and Materials) 1999.

Boswell FC (1975) Municipal sewage sludge and selected element application to soil: effect on soil and fescue. J Environ Qual 4:267-272.

Bravo, M. Minimización de Residuos. Seminario Internacional CYTED, Costa Rica, 1999.

- Bengtsson, M., & Tillman, A.-M. (2004). *Actors and interpretations in an environmental controversy: the Swedish debate on sewage sludge use in agriculture. Resources, Conservation and Recycling* 42(1): 65-82. doi:10.1016/j.resconrec.2004.02.004.
- Bernat, J. X. (n.d.). *Procedimientos Compatibles con la Legislación Medioambiental de la U. E. Metodología / Equipos*, 261-262.
- Blöcher, C., Niewersch, C., & Melin, T. (2012). *Phosphorus recovery from sewage sludge with a hybrid process of low pressure wet oxidation and nanofiltration. Water research* 46(6) 2009-19.
- Brown, S. L., Henry, C. L., Chaney, R., Compton, H., & Devolder, P. S. (2003). *Using municipal biosolids in combination with other residuals to restore metal-contaminated mining areas*, 203-215.
- Cao, Y., & Pawłowski, A. (2012). *Sewage sludge-to-energy approaches based on anaerobic digestion and pyrolysis: Brief overview and energy efficiency assessment. Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(3), 1657-1665.
- Carbonell, G., Pro, J., Gómez, N., Babín, M. M., Fernández, C., Alonso, E., & Tarazona, J. V. (2009). *Sewage sludge applied to agricultural soil: Ecotoxicological effects on representative soil organisms. Ecotoxicology and environmental safety*, 72(4), 1309-1319.
- Cartmell, E., Gostelow, P., Riddell-Black, D., Simms, N., Oakey, J., Morris, J., Jeffrey, P., Howsam, P., Pollard, S.J., 2006. *Biosolids – a fuel or a waste? An integrated appraisal of five co-combustion scenarios with policy analysis. Environ. Sci. Technol.* 40, 649–658.
- Cenni, R., Janisch, B., Splietho, H., & Hein, K. R. G. (2005). *Legislative and environmental issues on the use of ash from coal and municipal sewage sludge co-® ring as construction material*, 21(2001).
- Chamy, R., & Chinga, P. (n.d.). *Co-digestión de rsu y lodos aerobios residuales , como alternativa a procesos de tratamiento tradicionales. XXVIII Congreso interamericano de Ingenieria Sanitaria y Ambiental. Can Cun, México, Octubre 2002*
- County, K., Point, W., & Plant, T. (2008). *Biosolids Recycling and Energy Recovery*, 1-7.
- Cuevas B. José, Oscar Seguel S., Achim Ellies Sch., José Dörner F.(2006). *Efectos de las enmiendas orgánicas sobre las propiedades físicas del suelo con especial referencias a la adición de lodos urbanos. RC Suelo Nutr. Veg.* 6 (2) 1-12

- Davis, R. D (1996) *The Impact of EU and UK Environmental Pressures on the Future of Sludge Treatment and Disposal*. *Water and Environment Journal*. 10. 65-69.
- Desarrollo, R., Sostenible, L., Sostenible, D. L., & Ciencia, M. D. (n.d.). *Generalización de secadores solares directos en cuba. análisis numérico de sus tendencias actuales*, 1-11.
- Devaney, D., Godley, a R., Hodson, M. E., Purdy, K., & Yamulki, S. (2008). *Impact of sewage sludge applications on the biogeochemistry of soils*. *Water science and technology : a journal of the International Association on Water Pollution Research*, 57(4), 513-8. doi:10.2166/wst.2008.006
- Dorado Valiño, M.; Letán, P.; Rodríguez, A.; Rosal, R.; Sanz, Juana M. and Villar Fernández, S. (2007) *Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales. Informe de Vigilancia Tecnológica, 2. Consejería de Educación. D.G. Universidades e Investigación, Fundación CEIM*.
- EB *Energy and building: G.F. Jones, R.W. Jones. Steady - state heat transfer in an insulated, reinforced concrete wall:the numerical simulation , and experiments.1999*
- En, L., Agrícolas, S., Valle, D. E. L., Profesora, V. P. R., Facultad, D., Ma, E. A., Investigadora, V. P., et al. (2002). *Aplicación de lodos residuales municipales en cultivo de haba (vicia, (1985). XXVIII Congreso interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Can Cun, México, Octubre 2002*
- Enright, J.F., 2004. *Waste or product? That is the question*. In: Papadimitriou, K., Stentiford, E.I. (Eds.), *Biodegradable and Residual Waste Management*. CalRecovery Europe Ltd., Leeds, p. 311.
- EPA *Biosolids Technology Fact Sheet Land Application of Biosolids September, 2002 Jacobs Lee W. y Mc. Creary Deliana S. Utilizing biosolids in Agricultural Land Michigan Estados Unidos, Diciembre del 2001*
- Epstein E (1975) *Effect of sewage sludge on some soil physical properties*. *J Environ Qual* 4:139–142
- Especialistas Ambientales, S.A. de C.V. 2001 *Manifestación de Impacto Ambiental modalidad particular Central Termoeléctrica - Energía de Baja California*
- Fonts, I., Gea, G., Azuara, M., Ábrego, J., & Arauzo, J. (2012). *Sewage sludge pyrolysis for liquid production: A review*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), 2781-2805. Elsevier Ltd. doi:10.1016/j.rser.2012.02.070

- Fountoulakis, M. S., & Manios, T. (2009). *Enhanced methane and hydrogen production from municipal solid waste and agro-industrial by-products co-digested with crude glycerol*. *Bioresource technology*, 100(12), 3043-7. Elsevier Ltd. doi:10.1016/j.biortech.2009.01.016
- Fytali, D., & Zabaniotou, a. (2008). *Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods—A review*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(1), 116-140. doi:10.1016/j.rser.2006.05.014
- Gasafi, E., Reinecke, M.-Y., Kruse, A., & Schebek, L. (2008). *Economic analysis of sewage sludge gasification in supercritical water for hydrogen production*. *Biomass and Bioenergy*, 32(12), 1085-1096.
- Gross, B., Eder, C., Grziwa, P., Horst, J., & Kimmerle, K. (2008). *Energy recovery from sewage sludge by means of fluidised bed gasification*. *Waste management (New York, N.Y.)*, 28(10), 1819-26.
- Guibelin, E. (2004) *Sludge thermal oxidation process: Mineral recycling, energy impact, and greenhouse effect gases release*. *Water Sci. Technol.* 49. 209-216.
- Hearing KC, Daniels WL, Feagly SE (2000) *Reclaiming mined lands with biosolids, manures and papermill sludges*. En Barnhisel R (Ed.) *Reclamation of Drastically Disturbed Lands*. Soil Sci. Soc. of America. Madison, WI, EEUU. pp. 615-644.
- Jensen, J., & Jepsen, S.-E. (2005). *The production, use and quality of sewage sludge in Denmark*. *Waste management (New York, N.Y.)*, 25(3), 239-47. doi:10.1016/j.wasman.2004.08.011
- Kalderis, D., Aivalioti, M., & Gidarakos, E. (2010). *Options for sustainable sewage sludge management in small wastewater treatment plants on islands: The case of Crete*. *Desalination*, 260(1-3), 211-217. Elsevier B.V. doi:10.1016/j.desal.2010.04.030
- Lavado Raúl S., Miguel A. Taboada (2002). *Factibilidad de valorización agrícola de biosólidos de plantas depuradoras*. *Manual de procedimientos para la aplicación en el campo*. Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires, Argentina
- Leckner, B., Amand, L.E., Lu Lo ücke, K., Werther, J., 2004. *Gaseous emissions from co-combustion of sewage sludge and coal/wood in a fluidized bed*. *Fuel* 83, 477–486.
- Lederer, J., & Rechberger, H. (2010). *Comparative goal-oriented assessment of conventional and alternative sewage sludge treatment options*. *Waste management (New York, N.Y.)*, 30(6), 1043-56. Elsevier Ltd. doi:10.1016/j.wasman.2010.02.025

- Lin, Y., Zhou, S., Li, F., & Lin, Y. (2012). Utilization of municipal sewage sludge as additives for the production of eco-cement. *Journal of hazardous materials*, 213-214, 457-465. Elsevier B.V. doi:10.1016/j.jhazmat.2012.02.020
- Lundin M, Olofsson M, Pettersson G, Zetterlund H. 2004. Environmental and economic assessment of sewage sludge handling options. *Resource conservatve cycle* 41:255–78.
- Marambio Cristina C. Ortega Rodrigo B. Departamento de Ciencias Vegetales; 2003; *Uso potencial de lodos derivados del tratamiento de las aguas servidas en la producción de cultivos en chile*, 20-23. Reed GP, NP Paterson, Y. Zhuo, DR Dugwell and R. Kandiyoti (2005)—Trace Element Distribution in Sewage Sludge Gasification: Source and Temperature Effects. *Energy & Fuels*. 19.
- Marando, G., Jiménez, P., Hereter, A., Julià, M., Ginovart, M., & Bonmatí, M. (2011). Effects of thermally dried and composted sewage sludges on the fertility of residual soils from limestone quarries. *Applied Soil Ecology*, 49, 234-241. Elsevier B.V. doi:10.1016/j.apsoil.2011.05.001
- Martín del Campo S. M.G, Vaca P. R, Lugo F. J, Gómez B.G, Esteller A. Ma.V, Garrido Hoyos. 2002. Aplicación de lodos residuales municipales en cultivo de haba (vicia faba l.) en suelos agrícolas del valle de Toluca. *Facultad de ciencias de la UAEM*.
- Metcalf and Eddy (2003) *Wastewater engineering: treatment and reuse*, 4th ed. McGraw Hill, New York, NY
- Modell, M., Mayr, S.T. & Kemna, A. (1994) Supercritical water oxidation of aqueous wastes. In: *Proc. of the 56th International Water Conference, Engineers Society of Western Pennsylvania, Pittsburgh, USA, 31 October–2 November*, pp. 479–488.
- Morera MT, Echeverria J, Garrido J (2002) Bioavailability of heavy metals in soils amended with sewage sludge. *Can J Soil Sci* 82:433–438
- Mosquera-Losada, M. R., Muñoz-Ferreiro, N., & Rigueiro-Rodríguez, a. (2010). Agronomic characterisation of different types of sewage sludge: policy implications. *Waste management (New York, N.Y.)*, 30(3), 492-503. Elsevier Ltd. doi:10.1016/j.wasman.2009.09.021
- Odegaard, H., Paulsrud, B., & Karlsson, I. (2002). Wastewater sludge as a resource: sludge disposal strategies and corresponding treatment technologies aimed at sustainable handling of wastewater sludge. *Water science and technology : a journal of the International Association on Water Pollution Research*, 46(10), 295-303. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12479484>

- Ojeda G, Alcaniz JM, Ortiz O (2003) *Runoff and losses by erosion in soils amended with sewage sludge. Land Degrad Dev* 14:563–573
- Ortiz-Hernández, Margarita E. Gutiérrez-Ruiz y Enrique Sánchez-Salinas. 1995. *Propuesta de manejo de los lodos residuales de la planta de tratamiento de la ciudad industrial del valle de Cuernavaca, estado de Morelos, México. Revista internacional de contaminación ambiental* (2), 105-115, 1995
- Otero, M., Calvo, L. F., Gil, M. V., García, a I., & Morán, a. (2008). *Co-combustion of different sewage sludge and coal: a non-isothermal thermogravimetric kinetic analysis. Bioresourcetechnology*, 99(14), 6311-6319.
- Rojas, L. M. G., Trujillo, L. A., Arauzo, J., & Sánchez, J. L. (2005). *Gasificación catalítica de lodos de aguas residuales .,Ingeniería Mecánica* 2, 15-22.
- Rulkens, W. (2008). *Sewage Sludge as a Biomass Resource for the Production of Energy : Overview and Assessment of the Various Options †*, 44(1), 9-15.
- Salcedo-Pérez Eduardo, Antonio Vázquez-Alarcón, Laksmi Krishnamurthy, Francisco Zamora-Natera, Efrén Hernández-Álvarez, Ramón Rodríguez Macías (2007). *Evaluación de lodos residuales como abono orgánico en suelos volcánicos de uso agrícola y forestal en Jalisco, México. INCI v. 32 n. 2 Caracas feb. 2007.*
- SEMARNAT (2002). *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. Secretaría del medio ambiente y recursos naturales. Diario Oficial de la Federación. 15 de agosto de 2003.*
- Singh, R. P., & Agrawal, M. (2008). *Potential benefits and risks of land application of sewage sludge. Waste management (New York, N.Y.)*, 28(2), 347-58. doi:10.1016/j.wasman.2006.12.010
- Stuczynski, and H. Compton (2001). *Using biosolids, composts, and tailor-made biosolids mixtures in remediating urban and brownfield sites and other metal-contaminated soils. 28 p. In Proc. Innovative Uses of Biosolids – A Symposium, Sept. 17-19, 2000, Chicago, IL. CD-ROM, Water Environmental Federation, Alexandria, VA*
- Svanstrom, M. (2005). *Environmental assessment of supercritical water oxidation and other sewage sludge handling options. Waste Management & Research*, 23(4), 356-366. doi:10.1177/0734242X05054324

- Tapia F. Francisco 2003. *Valorización agrícola de lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas servidas, como fertilizante en cultivos anuales. Experiencias en Chada 2001-2003 Inia- La Platina Chile.*
- Taruya, T., Okuno, N., & Kanaya, K. (2002). *Reuse of sewage sludge as raw material of Portland cement in Japan. Water science and technology : a journal of the International Association on Water Pollution Research*, 46(10), 255-8. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12479479>
- Tester, J.W., Holgate, H.R., Armellini, F.J., Webley, P.A., Kililea, W.R., Hong, G.T. & Barner, H.E. (1993) *Supercritical Water Oxidation Technology, Process Development and Fundamental Research, American Chemical Society Symposium Series, 518, pp. 35–76.*
- U.S. Environmental Protección Agency. 2000. EPA Washington DC: 832-F00-024, Sept. 2000.
- Valdéz Pérez MA, Ramos Valdivia AC, Franco Hernández MO, Flores Cotera LB, Dendooven L.(2008). *Biosólidos estabilizados y vermicomposta de biosólidos como fuente de nitrógeno en cultivos de frijol.*
- Vargas Camareno, Maricruz; Montero Villalobos, Mavis *Estudio del uso del lodo residual de la empresa Extralum S. A. como material alternativo en la fabricación de cementos especiales. Tecnología en Marcha. Vol. 19-3 2006*
- Wang, H., Brown, S. L., Magesan, G. N., Slade, A. H., Quintern, M., Clinton, P. W., & Payn, T. W. (2008). *Technological options for the management of biosolids. Environmental science and pollution research international*, 15(4), 308-17. doi:10.1007/s11356-008-0012-5
- Wang, X., Chen, T., Ge, Y., & Jia, Y. (2008). *Studies on land application of sewage sludge and its limiting factors. Journal of hazardous materials*, 160(2-3), 554-8. doi:10.1016/j.jhazmat.2008.03.046
- Werther, J., Ogada, T., 1999. *Sewage sludge combustion. Prog. Energ. Combust.* 25, 55–116.
- World Health Organization (1989): *Health Guidelines For the use of wastewater in agriculture and aquaculture. Report of a who scientific group, Geneva, Switzerland.*
- Zheng, G., Kozinski, J.A., 2000. *Thermal events occurring during the combustion of biomass residue. Fuel* 79, 181–192.

<http://www.sefoa.gob.mx> Principales productos agrícolas del estado de Baja California 2009.

<http://www.fira.gob.mx> Rentabilidad de Cultivos. 2007

Manuel Bigeriego Martín De Saavedra 2001. CIT-INIA- Madrid disponible en <cidta.usal.es/residuales/libros/logo/pdf/Ecologia_en_Internet.PDF

Felipe I. Arreguín, Gabriela Moeller. Violeta Escalante, Armando Rivas (1999). El reuso del agua en México. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Instituto nacional de ecología (INE) Reporte crecimiento industrial, disponible en http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/libros/100/cap3_3.html

8. ANEXOS

1.-Características de lodos en tanques sépticos, modificado del manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Comisión nacional del agua (CONAGUA 2007)

Parametro	Media ^a	Desviación Estándar ^a	Ámbito ^a
Solidos Totales (ST)	38,800	23,700	3600-106,000
Solidos Volátiles Totales(SVT)			
% de solidos totales			
Solidos suspendidos volátiles			
(SSV) % de solidos suspendidos	67.0	9.3	51-85
Demanda Bioquímica de Oxígeno de 5 días (DBO5)	5,000	4,570	1,460-18,600
Demanda Química de Oxígeno Total (DQO _T)	42,850	36,950	2,200-190,000
Carbono Orgánico Total	9,930	6,990	1,316-18,400
Nitrógeno Total Kjeldahl (NTK)	677	427	66-1560
Nitrógeno Amoniacal (NH ₃ -N)	157	120	6-385
Fosforo Total (P-Total)	253	178	24-760
pH (unidades)	6.9	-	6.0-8.8
Grasas	9,090	6,530	604-23,468
Hierro(Fe)	205	184	3-750
Zinc (Zn)	49.0	40.2	4.5-153
Aluminio (Al)	48	61	2-200
Plomo (Pb)	8.4	12.7	1.5-31
Cobre (Cu)	6.4	8.3	0.3-38
Manganeso (Mn)	5.02	6.25	0.5-32
Cromo (Cr)	1.07	.64	0.3-2.2
Niquel (Ni)	.90	.59	0.2-3.7
Cadmio (Cd)	.71	2.17	<.05-10.8
Mercurio (Hg)	.28	.79	<.0002-4.0
Arsénico (As)	.16	.18	0.03-0.5
Selenio (Se)	.076	.074	<0.02-0.3

a- Valores de concentraciones en mg/l.

2.-Los resultados de las pruebas efectuadas y su comparación con los Límites Máximos Permisibles establecidos por la NOM-052-SEMARNAT-2005, se resumen a continuación:

Parámetro	Numeral (NOM-052-SEMARNAT-05)	Alcance	Resultado	Límite Máximo Permissible (LMP)
CORROSIVIDAD	7.2.1	A	NO APLICA	2 < pH < 12,5
	7.2.2	A	7,73	2 < pH < 12,5
	7.2.3	A	NO APLICA	< 6,35 mm/año
REACTIVIDAD	7.3.1	B	NEGATIVO	NEGATIVO
	7.3.2	B	NEGATIVO	NEGATIVO
	7.3.3	B	NEGATIVO	NEGATIVO
	7.3.4	A	59,5	250 mg HCN/Kg
	7.3.4	A	491,9	500 mg H ₂ S/Kg
INFLAMABILIDAD	7.6.1	A	NO APLICA	Líquido, > 60,5°C
	7.6.1	A	NO APLICA	<24% Alcohol (Etanol)
	7.6.2	B	NEGATIVO	NEGATIVO
	7.6.3	C	NO APLICA	NEGATIVO
	7.6.4	C	NO APLICA	NEGATIVO
TOXICIDAD AL AMBIENTE	7.5.1	A	MENORES A LOS LMPs	Ver Tabla 2 NOM-052-SEMARNAT-2005

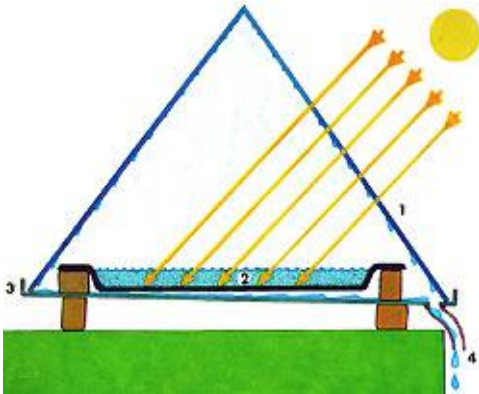
NOTAS:

ALCANCE A: DISPOSICIÓN DE METODOLOGÍA OFICIAL Y LIMITE MÁXIMO PERMISIBLE NUMERICO

ALCANCE B: DISPOSICIÓN DE METODOLOGÍA PROPIA Y LIMITE MÁXIMO PERMISIBLE CUALITATIVO

ALCANCE C: DECLARACIÓN BASADA EN INFORMACIÓN PROPORCIONADA POR EL GENERADOR Y /O A LA NATURALEZA DEL RESIDUO

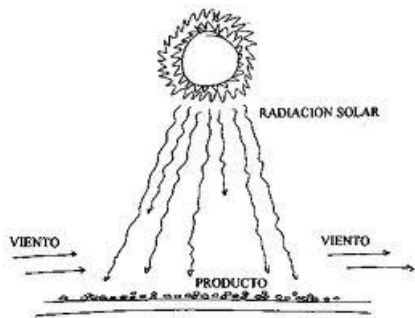
Esquemas e imágenes de principios de diseño en secador solar para la planta termoeléctrica “La Rosita” en Mexicali Baja California.



Principio de recuperación de agua por medio de destilación, usando como fuente de energía el sol.



Imagen de un secador de lodos tradicional tipo invernadero



Principio básico de secado usando la energía del sol y el viento.

Opciones de equipos disponibles para el manejo de lodos dentro de las instalaciones de la planta.



Equipo multifuncional Bobcat con oruga.