UNIVERSIDAD AUTONOMA METROPOLITANA
Casa abierta al tiempo Azcapotzalco

CBI DIVISIÓN CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA
UAM - Azcapotzalco

Evaluación y estabilización de los lodos generados en la planta de tratamiento de aguas residuales de la UAM-A

Proyecto Terminal de Ingeniería Ambiental

Presenta:

Laura Andrea Londoño Montoya

Asesores:

M. en C. Margarita Beltrán Villavicencio

M. en C. Abelardo González Aragón

Agosto de 2008

Resumen

Los lodos se generan en los procesos físicos, químicos y biológicos en el tratamiento de aguas residuales. El tratamiento de estabilización de los lodos implica una serie de procesos en los cuales se reduce la peligrosidad de los mismos y se busca darles un uso ajeno a su disposición como residuos peligrosos.

La generación de lodos ha sido uno de los problemas más impactantes en el tratamiento del agua, ya que ellos poseen una gran cantidad de características químicas, físicas y biológicas que representan una amenaza para la salud pública y el ambiente y a su vez están constituidos por materia orgánica y nutrientes que los hacen ideales como mejoradores de suelo.

Existen varios tipos de tratamiento de lodos, uno de ellos es la estabilización alcalina que consiste en elevar el pH de estos por medio de la adición de compuestos químicos alcalinos. Este método es conocido como uno de los más económicos y efectivos para la estabilización de lodos.

En la planta piloto de tratamiento de aguas residuales de la UAM – Azcapotzalco, se generan lodos procedentes de un tratamiento primario avanzado con un alto potencial de reuso como mejoradores de suelo, composta, material de relleno, entre otros, por lo que esta investigación representó el primer paso para la estabilización y aprovechamiento de los mismos.

Para estabilizar los lodos, una vez que se definió la generación de estos y su caracterización, se experimentó con 2 productos químicos alcalinos: $Ca(OH)_2$ y NaOH. Se probaron tres dosis de $Ca(OH)_2$, una baja de 0.344 kg $Ca(OH)_2$/kg ST, una media de 1.203 kg $Ca(OH)_2$/kg ST y una alta de 1.761 kg $Ca(OH)_2$/kg ST y tres dosis de NaOH, una baja con valores de 0.180 kg NaOH/kg ST, la media con 0.541 kg NaOH/kg ST y la alta con 0.901 kg NaOH/kg ST. Con estas aplicaciones a las 24 horas de estabilización se mantuvo un pH de 9.69 ± 0.38, 12.03 ± 0.51,

12.5 ± 0.15 con la adición baja, media y alta de $Ca(OH)_2$ respectivamente y de 10.02 ± 0.56, 11.77 ± 0.77 y 12.72 ± 0.12 con la adición baja, media y alta de NaOH.

De las dosis determinadas se eligió la dosis media para cada uno de los compuestos químicos alcalinos como la dosis apropiada al alcanzar un pH de 12.03 ± 0.51 por 24 horas con el tratamiento con $Ca(OH)_2$ y de 11.77 ± 0.77 por 24 horas con el tratamiento con NaOH.

Con estos tratamientos se llegaron a las concentraciones estipuladas en la NOM-004-SEMARNAT-2002 en cuanto a patógenos, parásitos y metales pesados.

Dedicatoria

Al hombre que por su honestidad y entrega es el ejemplo perfecto del profesional ideal y que no descansó jamás hasta dejarme la mejor herencia que alguien puede recibir, la educación. Gracias papi.

A mi mamá, que me escuchó y apoyó durante toda mi carrera, pero que sobretodo me enseñó a ser una mujer con principios, luchadora y a tener confianza propia.

A mis hermanos Naty, Isa y Juan que son mis compañeros de vida, y con los que comparto día a día las tristezas y alegrías.

A José Antonio, el amor de mi vida, que con paciencia y ternura me ayudó a superar los obstáculos diarios.

A Erika y Caro, mis colegas y compañeras de lucha durante esta importante etapa de mi vida. Gracias por su apoyo incondicional, amistad y cariño.

Agradecimientos

*A mi asesora **Margarita Beltrán**, de la cual no puedo hacer otra cosa mas que admirar su carácter y calidad como profesional y como mujer y tomarla como un ejemplo de vida, gracias por confiar en mí.*

*A mi asesor **Abelardo González**, por siempre tener las puertas abiertas a mis dudas, por ayudarme a terminar mi proyecto y por sus consejos, los cuales siempre me pusieron los pies sobre la tierra.*

*Gracias a mi gran amigo **Adán** que me ayudó desde el inicio hasta el final de mi proyecto por sus asesorías, consejos y siempre estar ahí cuando lo necesitaba y que junto con **Laura** me abrieron las puertas de la planta. A **Miguel** y **Sil** por sus atinados consejos y apoyo. En general a todos los **plantitos** y **labitos**, en especial a Ruth, Miriam, Liz, Erika, Hugo y Roy que me ayudaron con la realización de mi proyecto, no habría podido hacerlo sin ustedes. ¡MIL GRACIAS!*

Agosto 2008

Contenido

Resumen ii
Dedicatoria iv
Agradecimientos v
Contenido vi
Lista de figuras ix
Lista de tablas x
1 Introducción 11
1.1 Antecedentes 11
1.2 Justificación 13
2 Objetivos 16
2.1 Objetivos generales 16
2.2 Objetivos específicos 16
3 Revisión bibliográfica 17
3.1 Tratamiento de agua 17
3.1.1 Tratamiento primario avanzado 18
3.1.2 Tipos de lodos producidos en el tratamiento de agua 19
3.1.3 Planta piloto de tratamiento de aguas residuales de la UAM Azcapotzalco 21
3.1.4 Características de los lodos y biosólidos 24
3.1.4.1 Propiedades físicas de los lodos 24
3.1.4.2 Propiedades químicas de los lodos 27
3.1.4.3 Propiedades biológicas de los lodos 28
3.2 Tratamiento de lodos 29
3.2.1 Estabilización biológica de lodos 30
3.2.2 Estabilización física de lodos 31
3.2.3 Estabilización química de lodos 32
3.2.4 Deshidratación de lodos y biosólidos 37
3.2.5 Secado de lodos y biosólidos 40
3.3 Disposición final de lodos y biosólidos 41

3.3.1 Aplicación de biosólidos en el campo 41
3.3.2 Incineración de biosólidos 42
3.3.3 Rellenos sanitarios 43
3.4 Normatividad de los lodos y biosólidos en México 44
4 Metodología 46
4.1 Muestreo de lodos 46
4.2 Caracterización de los lodos 47
4.2.1 pH 47
4.2.2 Sólidos totales y materia orgánica 48
4.2.3 Sólidos volátiles 48
4.2.4 Coliformes fecales 48
4.2.5 Salmonella spp. 48
4.2.6 Huevos de Helmintos 49
4.2.7 Metales pesados 49
4.3 Estabilización alcalina de lodos residuales 50
4.3.1 Estabilización por etapas 50
4.3.1.1 1ª Etapa de la determinación de la dosis 50
4.3.1.2 2ª Etapa determinación de la dosis 51
4.4 Generación de lodos en la planta piloto 51
5 Resultados 52
5.1 Caracterización de lodos 52
5.2 Caracterización de biosólidos 52
5.3 Estabilización con hidróxido de calcio 56
5.3.1 Determinación de la dosis de $Ca(OH)_2$ (1ª Etapa) 56
5.3.2 Determinación de la dosis de $Ca(OH)_2$ (2ª Etapa) 57
5.3.3 Características de los biosólidos de $Ca(OH)_2$ después de 7 días 62
5.4 Estabilización con hidróxido de sodio 63
5.4.1 Determinación de la dosis de NaOH (1ª Etapa) 63
5.4.2 Determinación de la dosis de NaOH (2ª Etapa) 64
5.4.3 Características de los biosólidos de NaOH después de 7 días 68
5.5 Generación de lodos 69
6 Análisis de resultados 71

6.1.1 Estabilización de lodos con $Ca(OH)_2$ 71
6.1.2 Características de los biosólidos de $Ca(OH)_2$ después de 7 días..... 73
6.1.3 Estabilización de lodos con NaOH..... 73
6.1.4 Características de los biosólidos de NaOH después de 7 días 74
7 Conclusiones y recomendaciones..... 75
8 Referencias bibliográficas 77

Lista de figuras

Figura 3.1. Planta de tratamiento: fachada (izquierda), proceso (derecha)..... 22
Figura 3.2. Tanque de estabilización de lodos 47
Figura 5.1. Torta de biosólidos de $Ca(OH)_2$ 55
Figura 5.2. Filtrado de biosólidos de $Ca(OH)_2$..... 55
Figura 5.3. Torta de biosólidos de NaOH 56
Figura 5.4. Filtrado de biosólidos de NaOH 56
Figura 5.5. Dosis máximas de $Ca(OH)_2$ 57
Figura 5.6. Dosis baja, media y alta de $Ca(OH)_2$ de izquierda a derecha. 58
Figura 5.7. Diagrama de correlación “Dosis de $Ca(OH)_2$ vs pH” 58
Figura 5.8. Diagrama de dispersión “Medias de las dosis de $Ca(OH)_2$” 60
Figura 5.9. Diagrama de caja y bigotes de las dosis de $Ca(OH)_2$ 61
Figura 5.10. Diagrama comparativo de las tres dosis de $Ca(OH)_2$..... 63
Figura 5.11. Dosis máximas de NaOH 64
Figura 5.12. Dosis baja, media y alta de NaOH de izquierda a derecha 65
Figura 5.13. Diagrama de correlación “Dosis de NaOH vs pH” 65
Figura 5.14. Diagrama de dispersión “Medias de las dosis de NaOH”..... 67
Figura 5.15. Diagrama de caja y bigotes de las dosis de NaOH 68
Figura 5.16. Diagrama comparativo de las tres dosis de sosa..... 69
Figura 5.17. Caja y bigotes de generación de lodos 70
Figura 6.1. Diagrama de medias de las dosis de $Ca(OH)_2$..... 72
Figura 6.2. Diagrama de medias y 95% de Fisher LSD “Dosis de NaOH” 74

Lista de tablas

Tabla 3.1. Tipos de lodos en el tratamiento de agua residual 21
Tabla 3.2. Factores que afectan las propiedades químicas de los lodos 27
Tabla 3.3. Dosis de cal requerida para estabilización de lodos en Lebanon, Ohio. (Adaptado de la WEF, 1995). 37
Tabla 3.4. Límites máximos permisibles para metales pesados en biosólidos..... 44
Tabla 3.5. Límites máximos permisibles para patógenos y parásitos en lodos y biosólidos. 45
Tabla 3.6. Aprovechamiento de biosólidos 45
Tabla 3.7. Métodos EPA para determinar metales pesados 50
Tabla 5.1. Caracterización de lodo crudo 52
Tabla 5.2. Características físico químicas y biológicas de los biosólidos 53
Tabla 5.3. Concentración de metales pesados en los biosólidos 54
Tabla 5.4. Dosis de $Ca(OH)_2$ aplicadas por prueba 57
Tabla 5.5. Análisis de varianza “Dosis de $Ca(OH)_2$” 59
Tabla 5.6. Análisis de varianza de las dosis de $Ca(OH)_2$ 60
Tabla 5.7. Análisis de contrastes de las dosis de $Ca(OH)_2$, método de la diferencia mínima significativa (LSD, Fisher) 61
Tabla 5.8. Dosis aplicadas de $Ca(OH)_2$ 62
Tabla 5.9. Dosis de NaOH aplicadas por prueba 64
Tabla 5.10. Análisis de varianza “Dosis de NaOH” 66
Tabla 5.11. Análisis de varianza de las dosis de NaOH 67
Tabla 5.12. Análisis de contrastes para las dosis de NaOH, método de la diferencia mínima significativa (LSD, Fisher) 68
Tabla 5.13. Dosis aplicadas de NaOH 69

1 Introducción

1.1 Antecedentes

En el tratamiento de agua residual, se producen “lodos” como subproductos, provenientes de sólidos originalmente presentes en el agua residual, o por formación de nuevos, como resultado de la transformación de sólidos disueltos y coloidales (Jiménez, 2001).

Los lodos provenientes de las plantas de tratamiento de aguas residuales se caracterizan por (Porta *et al.*, 1999):

- Ser un material relativamente heterogéneo.
- Contener elementos que se suelen aportar al suelo en forma de fertilizantes.
- Contener metales pesados, tales como Cd, Cu, Pb, Hg, Ni, Zn, que en dosis elevadas pueden resultar tóxicos para los cultivos.
- Contener compuestos orgánicos naturales y xenobióticos, como agroquímicos y metabolitos.
- Contener ion sodio, si para la floculación de los lodos se utilizan polielectrolitos que lo incluyen.
- Tener una gran cantidad de microorganismos patógenos y parásitos, tales como Coliformes fecales, *Salmonella spp* y Huevos de Helmintos (NOM-004-SEMARNAT-2002).

Cuando los lodos provienen de plantas de tratamiento de agua residual municipales y han recibido algún tratamiento (estabilización/digestión) se les denomina biosólidos.

La adición de compuestos químicos alcalinos es un método muy confiable de estabilización que ha sido practicado en las plantas de tratamiento de aguas residuales desde 1890 (WEF, 1995). Este método consiste en el uso de compuestos como el hidróxido de calcio, (también conocido como cal hidratada ($Ca(OH)_2$)) el cual se adiciona para aumentar el pH hasta 12 o más con un tiempo de contacto adecuado para inactivar o destruir microorganismos patógenos. Existen 2 formas de estabilización alcalina: la preestabilización y la postestabilización, en la primera, el hidróxido de calcio es adicionado antes del deshidratado y en la segunda el hidróxido de calcio se añade a la pasta obtenida después del proceso de deshidratado. En la postestabilización usualmente se usa la cal viva (óxido de calcio, CaO) para aprovechar el calor generado en la reacción e incrementar la destrucción de microorganismos patógenos (Jiménez, 2001).

Entre los mercados potenciales de los biosólidos estabilizados con tratamiento alcalino se encuentran (EPA, 1999):

- La agricultura (como mejoradores de suelo).
- Como relleno para estructuras.
- Como material de cobertura en rellenos sanitarios.

MacConnell y colaboradores (1992), estudiaron varios productos alcalinos para la estabilización de lodos municipales entre los cuales se pueden mencionar: cal hidratada, cal viva, residuos de cemento, entre otros; estos ofrecen beneficios como la reducción de patógenos y de atracción de vectores, controlan los malos olores e incrementa la concentración de sólidos. El lodo estabilizado, puede usarse como mejorador del suelo, como material de cobertura para rellenos sanitarios y como fertilizantes, entre otros.

Jiménez y colaboradores (2000), estudiaron la postestabilización alcalina de los lodos residuales con alto contenido de microorganismos patógenos para determinar la viabilidad de producir biosólidos Clase B (los biosólidos se clasifican en clase A, B y C en función de su contenido de patógenos y parásitos [NOM-004-

SEMARNAT-2002]. Los lodos fueron estabilizados usando cal viva en dosis de 15 a 40% (peso/peso). Las dosis de hidróxido de calcio, fueron determinadas por el contenido de sólidos de acuerdo al criterio de pH-tiempo y de microorganismos establecidos por la EPA.

The Greater Moncton Sewerage Commission ha desarrollado en colaboración con la National Defence Canada un programa para el manejo de los biosólidos y el rescate del campo militar de entrenamiento de la Canadian Forces Base (CFB) Gagetown, New Brunswick en el que se busca usar biosólidos estabilizados con hidróxido de calcio como mejoradores de suelo. Esto resulta ser una alternativa viable debido a que el costo en el mantenimiento de estos campos es muy alto, además del aprovechamiento de los biosólidos generados en las plantas de tratamiento (LeBlanc *et al*., 2006).

Hsiau, (1997) estudió los efectos de la estabilización con hidróxido de calcio sobre el fraccionamiento y extracción de metales pesados (Cu, Pb, Cr, y Zn) en lodos residuales tratados con hidróxido de calcio, y lodos sin hidróxido de calcio. Se demostró con las pruebas realizadas, que metales como el Cu que tuvieron una mayor fragmentación en los lodos sin hidróxido de calcio, resultaron más inestables en los lodos estabilizados con hidróxido de calcio, de igual forma, los metales con una menor fragmentación (es decir, que tienen una mayor afinidad a los compuestos orgánicos) como el Zn, fueron más estables en los lodos estabilizados.

1.2 Justificación

El manejo de los biosólidos y la remoción de contaminantes por tratamiento han sido y continúan siendo uno de los más caros y difíciles problemas en el campo de la ingeniería de tratamiento de aguas residuales (Tchobanoglous, 2004).

- En México se han aplicado lodos o biosólidos a tierras de cultivos no restringidos, como el maíz, frijol, haba y coliflor entre otros, lo que demuestra diversos beneficios a los cultivos así como a los suelos sin embargo, surgen problemas asociados con la aplicación de biosólidos en los suelos los cuales corren el riesgo de contaminar plantas y acuíferos con microorganismos patógenos y elementos químicos además de la posible existencia de olores desagradables. Es por eso que es necesario reducir el alto contenido microbiológico antes de aplicar los lodos en la agricultura para reducir los riesgos a la salud humana y al ambiente. Basta mencionar que los lodos fisicoquímicos de México contienen aproximadamente 3 y 6 órdenes de magnitud más de coliformes fecales y *Salmonella spp*. que los lodos primarios de otros países. Así mismo, el contenido de Huevos de Helminto (promedio en huevos/g de masa seca) es de 59 en lodos primarios fisicoquímicos provenientes del agua residual de la Ciudad de México, mientras que en lodos de plantas de tratamiento de Estados Unidos este valor es menor que 1 (Murillo *et al*., 2007).

La planta de tratamiento de agua de la UAM-Azcapotzalco fue creada con el fin de disminuir en cierto grado el impacto negativo que representan las descargas de contaminantes al agua, de tal manera que ésta pueda ser reutilizada para el riego de las áreas verdes de la universidad.

La planta de tratamiento de aguas de la UAM-A procesa las aguas negras provenientes tanto de los baños como de los laboratorios que se encuentran aproximadamente a 400 metros de la misma (desde el edificio G hasta el edificio P) a razón de 30 L/min y reciben un tratamiento. El tratamiento consiste inicialmente en un primer tanque donde se le adicionan bajas dosis de coagulante (usualmente se utiliza sulfato de aluminio, $Al_2(SO_4)_3$), para posteriormente pasar a un segundo tanque en donde se adicionan pequeñas cantidades de floculante (polímero aniónico de alto peso molecular y alta densidad de carga); finalmente se pasa a un tanque de sedimentación de alta tasa en donde ocurre la sedimentación

de lodos (Jiménez, 2001), es en este punto en donde surge la problemática debida a la gran cantidad de lodos generados por la adición de compuestos químicos (Tchobanoglous, 2004), que entre otras cosas, se caracterizan por tener un alto potencial de reuso en aplicaciones agrícolas, composteo, material de relleno, entre otros, una vez que se les ha dado un tratamiento.

En México la Norma oficial mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002 establece los límites máximos permisibles de contaminantes para los lodos residuales que sean dispuestos o aprovechados, por lo que en este proyecto se caracterizarán los lodos en concordancia con la norma anterior, antes y después del tratamiento de estabilización alcalina, para así poder determinar la clase de biosólido que se obtendrá de manera que se le pueda dar un uso final. Es importante destacar que la estabilización con hidróxido de calcio tiene un costo muy bajo, y es un buen método emergente de estabilización de fácil operación (Jiménez, 2001), lo cual significaría grandes beneficios no solo para la universidad, también al ambiente ya que en lugar de generarse un residuo, se genera un producto útil.

En este proyecto se les dará un tratamiento de estabilización alcalina a los lodos, con dos diferentes compuestos químicos: hidróxido de calcio e hidróxido de sodio; de acuerdo a los criterios establecidos por la NOM-004-SEMARNAT-2002.

2 Objetivos

2.1 Objetivo general

Evaluar la factibilidad de la estabilización alcalina de los lodos provenientes del tratamiento primario avanzado.

2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar los lodos generados en el Tratamiento Primario Avanzado (TPA).

- Estabilizar en medio alcalino los lodos del TPA utilizando hidróxido de calcio e hidróxido de sodio.

- Determinar las dosis de hidróxido de calcio e hidróxido de sodio necesarias para la estabilización del lodo generado en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la UAM-A.

3 Revisión bibliográfica

3.1 Tratamiento de agua

Un sistema de tratamiento de agua se compone de la combinación de operaciones y procesos unitarios que tienen por objeto reducir determinados compuestos hasta un nivel predeterminado. Las operaciones son sistemas en donde intervienen, básicamente, fuerzas físicas de separación, en tanto que los procesos involucran cambios de estados de la materia por medio químicos o biológicos (Jiménez, 2001).

Actualmente tanto las operaciones unitarias como los procesos, se encuentran agrupados para proveer varios niveles de tratamiento conocidos como pretratamiento, tratamiento primario, primario avanzado, secundario (con o sin remoción de nutrientes), y avanzado o terciario.

Pretratamiento: en esta etapa, se remueven trapos, palos, materia flotante, arenas, y grasas que pueden causar problemas en el mantenimiento y/u operación de los procesos, operaciones y sistemas auxiliares de tratamiento.

Tratamiento primario: en esta etapa se remueve parte de la materia orgánica y de los sólidos suspendidos del afluente, para lo cual se usa una operación física, tal como la sedimentación, amén de remover el material flotante y sedimentable del agua residual.

Tratamiento primario avanzado: con este tratamiento, la remoción de materia orgánica y de sólidos es mayor. Generalmente se complementa con adición de compuestos químicos o con filtración.

Tratamiento secundario: en este nivel, ocurre la remoción de la materia orgánica biodegradable (en solución o en suspensión) y de los sólidos suspendidos. La desinfección también se incluye en el tratamiento secundario convencional.

Tratamiento secundario con remoción de nutrientes: en esta fase, además de la remoción de la materia orgánica biodegradable y de los sólidos suspendidos, también se remueven nutrientes tales como nitrógeno, fósforo o ambos.

Tratamiento terciario: en este tratamiento, se remueven los sólidos suspendidos que quedan del tratamiento secundario, generalmente se utiliza la filtración en medio granular o un cribado muy fino (micro cribado). Tanto la desinfección como la remoción de nutrientes se incluyen en esta etapa.

Tratamiento avanzado: cuando se quiere reusar el agua tratada en determinadas aplicaciones, es necesario la remoción del material disuelto o suspendido que quedó del tratamiento biológico (Tchobanoglous, 2004).

3.1.1 Tratamiento primario avanzado

El tratamiento primario avanzado está diseñado para remover contaminantes que no pueden ser eliminados de manera adecuada por el tratamiento secundario. Entre estos contaminantes se pueden incluir componentes inorgánicos solubles tales como el fósforo o el nitrógeno, los cuales favorecen el crecimiento de algas en el agua tratada; la materia orgánica que contribuye en gran parte a la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), la Demanda Química de Oxígeno (DQO), el color, el sabor, y el olor; las bacterias y los virus; la materia coloidal que le aporta turbiedad al agua; o los minerales solubles que pueden interferir con el reuso del agua tratada.

El propósito del tratamiento primario avanzado es atenuar la carga de contaminantes que se reciben del agua de entrada y/o proveer una calidad de

agua adecuada para su reuso. De igual manera este proceso puede ser usado como un complemento del tratamiento secundario convencional o reemplazarlo completamente (Culp, 1978).

3.1.2 Tipos de lodos producidos en el tratamiento de agua

Los lodos son producidos generalmente en el tratamiento primario, biológico y químico del agua residual. En muchas plantas de tratamiento de aguas residuales se emplea la sedimentación primaria, seguida por un tratamiento secundario de lodos activados. Los lodos producidos en el tratamiento primario pueden llegar a contener hasta un 50% de sólidos totales en base seca, lo que permite que se puedan manipular de una manera más eficiente que los lodos químicos y biológicos.

La remoción de sólidos suspendidos depende de la naturaleza de los mismos, sin embargo, es imposible prever los efectos adversos que algunos componentes pudieran tener sobre la eficiencia de remoción, tales como los sólidos suspendidos industriales. Los compuestos químicos que le son adicionados al agua residual ya sea para la remoción de fósforo o para la coagulación de los sólidos pueden formar una gran cantidad de precipitados, que dependen del tipo y cantidad de compuestos químicos, de la composición del agua residual y del proceso como se desarrolla la coagulación y la clarificación.

De acuerdo al proceso donde se produce el lodo, se les da diferentes nombres:

Lodos biológicos: los procesos típicos donde se producen los lodos biológicos son lodos activados, filtros percoladores, tanques de contacto biológico, entre otros. Las cantidades y propiedades de los lodos varían de acuerdo al crecimiento metabólico de los microorganismos presentes mientras que su volumen y concentración están determinados por la operación de los tanques de

sedimentación y clarificación. Los lodos biológicos son generalmente más difíciles de espesar y desaguar que los lodos primarios y más aún que los lodos químicos.

Lodos químicos: existen varias clases de precipitación en el tratamiento de aguas residuales, que dependen del agente químico que se le adicione al proceso.

Precipitado de carbonatos: producidos en el tratamiento con cal donde se forma carbonato de calcio ($CaCO_3$).

Precipitado de fósforo: donde se incluyen por ejemplo $AlPO_4$, $Al(H_2PO_4)(OH)_2$, $FePO_4$, y $Ca(PO_4)_2$.

Precipitado de hidróxido: producidos por sales de hierro y aluminio; el exceso de sales forma hidróxidos ($Fe(OH)_3$ ó $Al(OH)_3$) con cal, con hidróxido de magnesio puede formar ($Mg(OH)_2$) y el magnesio proveniente del afluente del agua residual puede formar sales de magnesio y cal.

Sólidos inertes: provienen de los mismos compuestos químicos; por ejemplo cuando se usa cal, el 92% de ésta es CaO y el 8% remanente son sólidos inertes que terminan en los lodos.

Polímeros: los polímeros son agentes químicos auxiliares al proceso de coagulación, lo cual resulta en un aumento en la cantidad de lodos en la sedimentación (Cheremisinoff, 1994).

El sulfato de aluminio es el producto químico más ampliamente usado en el proceso de coagulación-floculación del tratamiento de agua, y produce un lodo conocido como *lodo de aluminio*. En la tabla 3.1 se encuentran resumidos los tipos de lodos producidos en el tratamiento de aguas residuales, así como algunas de sus principales características (Vesilind, 1975).

Tabla 3.1. Tipos de lodos en el tratamiento de agua residual (Adaptado de Vesilind, 1975)

Tipo de lodo	Concentración % sólidos	Características
Crudo primario	4-8	Mal olor; color de gris a café; poco escurrimiento en las camas de secado; pero puede ser deshidratado mecánicamente.
Digestión primaria anaeróbica	6-10	Buen deshidratado en las camas de secado; color negro, olor a tierra mojada, produce gas.
Humus filtrado	3-4	Consistencia esponjosa, color café.
Lodo activado	0.5-1.5	Poco olor; color de amarillo a café; consistencia esponjosa; difícil de desaguar, alta actividad microbiológica.
Digestión mixta (lodo primario + lodo activado)	2-4	Color de negro a café; produce gas; consistencia húmeda; no es tan accesible para desaguar como el lodo primario digerido.
Digestión aeróbica	1-3	Color de amarillo a café, es difícil de desaguar algunas veces, gran actividad biológica.
Lodo de aluminio	0.5-1.5	Color de gris a amarillo, poco olor; muy difícil de desaguar.

3.1.3 Planta piloto de tratamiento de aguas residuales de la UAM - Azcapotzalco

La planta piloto de aguas residuales de la UAM Azcapotzalco, tiene una capacidad para operar a 0.50 L/s como gasto medio de diseño y 0.75 L/s como gasto máximo (figura 3.1).

Figura 3.1. Planta de tratamiento: fachada (izquierda), proceso (derecha)

El tren de tratamiento de la planta piloto consta de un pretratamiento que se encuentra en un cárcamo de bombeo, en el cual el agua residual se almacena previamente antes de ser bombeada al tratamiento primario. Este cárcamo tiene la función de sedimentar las arenas, y retener los sólidos más grandes por medio de rejillas. Dos bombas trituradoras desmenuzan huesos, carne, cartílago y cáscaras de frutas, reduciendo el tamaño de la materia orgánica para su tratamiento posterior.

El agua residual entra a un tratamiento primario avanzado, que se encuentra integrado por tres cámaras de coagulación-floculación en donde se adiciona coagulante y un polímero para agilizar la precipitación de los flóculos en el sedimentador de alta tasa. En el proceso de coagulación-floculación, el agua residual pasa a la primera cámara de mezcla rápida donde se le adiciona sulfato de aluminio como coagulante con un tiempo de retención de 30 segundos, para dispersar el coagulante y favorecer el contacto con el agua; luego pasa a un

mezclado un poco más lento en la segunda cámara y uno aún más lento en la tercera cámara en donde se le adiciona al agua un polímero, esto con el fin de aumentar el tamaño y/o densidad de los flóculos, para posteriormente ser eliminados del agua por medios físicos como la sedimentación. Las cámaras de floculación tienen un tiempo de retención total de 30 minutos, dimensiones de 1.8x0.9 m y están separadas por placas perforadas para aumentar el tiempo de contacto y disminuir la velocidad del agua.

La sedimentación de alta tasa, consta de un sedimentador de flujo laminar de placas paralelas con una altura total de 3.70 m, un área superficial de 0.90 m^2 y una carga hidráulica de diseño de 72 m^3/m^2 día, con un canal de colección central del agua tratada, que la dirige a dos columnas de filtración por gravedad con 0.406 m de diámetro y 4 m de alto, con medio simple de carbón de antracita que tiene como fin la remoción de sólidos suspendidos. Estas columnas trabajan individualmente (mientras una opera, la otra se encuentra en reposo) y cuando el medio filtrante se satura, se retrolavan a presión con agua tratada, a una tasa de 30 gpm/pie^2 por 15 minutos.

Posteriormente el agua tratada pasa por una unidad de microfiltración (filtros cartucho) en donde se remueven microorganismos, huevos de Helmintos y partículas, seguido por una doble desinfección que consta de una lámpara de luz ultravioleta (lámpara de media presión) y una desinfección química con hipoclorito de sodio (González, 2007).

Aunado a estos procesos, se encuentran los que no están aún habilitados, pero que en un futuro se unirán al tren de tratamiento, como lo son:

Columnas de adsorción de carbón activado
Filtración por membrana por ósmosis inversa
Columna de desinfección de ozono

Tanque de estabilización de lodos de 250 L (con sistema de dosificación de productos químicos)
Filtro prensa

Actualmente se producen lodos a razón de 175 L/día con un alto potencial de reuso como mejoradores de suelo, composta, entre otros por lo que se están realizando proyectos para el manejo y reuso de los mismos.

Además, la Planta de Tratamiento cuenta con un laboratorio habilitado para la realización de pruebas para el control adecuado del tratamiento del agua, entre las cuales se pueden mencionar pruebas para determinar parámetros biológicos como Coliformes Totales (CT), Coliformes Fecales (CF), *Salmonella spp*.; materia orgánica como Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), Demanda Química de Oxígeno (DQO); composición física como turbiedad, Sólidos Suspendidos Totales (SST), entre otros.

3.1.4 Características de los lodos y biosólidos

Las características de los lodos producidos en el tratamiento de agua pueden variar significativamente de acuerdo a las cualidades del agua residual misma y al diseño y operación de las plantas de tratamiento así como el tratamiento posterior que se le dé a los lodos. Estas características pueden dividirse en tres grandes categorías: físicas, químicas y biológicas.

3.1.4.1 Propiedades físicas de los lodos

Las propiedades físicas más importantes que describen a los lodos y biosólidos son: la gravedad específica, concentración de sólidos y la materia orgánica.

Gravedad específica

La gravedad específica se define como la relación entre el peso del material y su correspondiente volumen de agua. La mayoría de los lodos tienen una gravedad específica de aproximadamente 1.0, que es casi igual a la del agua. Si un litro de lodo pesa 1010 g, la gravedad específica se calcula como sigue:

$$S = \text{Gravedad específica del lodo} = \frac{1010\,g}{1000\,g} = 1.01$$

Los lodos raramente están compuestos por un solo sólido y un solo líquido, por lo que la gravedad específica debe ser calculada de la siguiente manera:

$$\frac{1}{S_s} = \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{W_i}{S_i} \right)$$

Donde S_s= gravedad específica del lodo

W_i = fracción peso de cada componente en el lodo

S_i = gravedad específica de cada componente

Concentración de sólidos

La concentración de sólidos es la relación entre las fracciones sólidas y líquidas de una muestra se describen como concentración de sólidos, y se expresa en mg/L o % de sólidos. Si se asume que una muestra tiene una gravedad específica de 1.0, entonces:

$$10{,}000\,\frac{mg}{L} = 1\%\,\text{sólidos}$$

Donde el porcentaje está expresado en términos de peso/peso.

Los sólidos totales en un lodo corresponden a la suma de los sólidos disueltos más los suspendidos, que más tarde se definirán como aquella

fracción incapaz de pasar a través de un filtro de fibra de celulosa (Vesilind, 1975).

Materia orgánica

Este parámetro es importante medirlo debido a que ayuda a mejorar las propiedades físicas del suelo cuando el biosólido es usado como mejorador de estos, tales como la estructura, el contenido de humedad y la capacidad de intercambio iónico. El contenido orgánico de los lodos tratados (biosólidos), varía dependiendo del contenido de sólidos y del tratamiento[1]. Un lodo puede llegar a contener hasta 70% de materia orgánica (Epstein, 2002).

Tamaño de partícula

Afecta directamente la facilidad de eliminar el agua de un lodo. Si la mayor parte de las partículas tienen tamaño entre 1 y 10 micras, el secado es más difícil.

Estado del agua

Determina la forma en que se podrá separar el agua del sólido, y se clasifica en: agua libre que se libera por acción de su propio peso, agua de flóculos que se logra separar por compresión mecánica, agua capilar, sólo se remueve a presiones muy altas y el agua de partículas, que se elimina por acción química o térmica.

Propiedades del fluido

Lodos líquidos, fluyen por gravedad

Lodos plásticos, pueden ser bombeados

Lodos sólidos susceptibles de ser compactados, no se pueden bombear, pero su volumen decrece a medida que se secan.

[1] Por ejemplo: digestión, adición de un agente bulking en caso de composteo, adición de agente alcalino ($Ca(OH)_2$, NaOH), etcétera.

Lodos con volumen constante, no reducen volumen al perder agua.

Reología

Los lodos se clasifican como fluidos no-Newtonianos y pseudoplásticos, es decir, se comportan como un sólido elástico.

Drenabilidad

Se relaciona directamente con la necesidad de transporte, de secado o de posibilidad de incineración. Para eliminar el agua de los lodos se emplean, principalmente, tres mecanismos: filtración, centrifugación y evaporación (Jiménez, 2001).

3.1.4.2 Propiedades químicas de los lodos

Las propiedades químicas de los lodos y biosólidos están afectadas por varios factores, presentados en la tabla 3.2, y pueden clasificarse en: elementos traza, metales pesados y micronutrientes, pH y nutrientes.

Tabla 3.2. Factores que afectan las propiedades químicas de los lodos

Factor	Motivo
Calidad del agua residual	Depende del pretratamiento industrial recibido.
Alcance del tratamiento	Tratamiento primario, secundario, terciario.
Tipo de proceso	Uso de productos químicos como pueden ser el cloruro férrico, polímeros, etcétera.
Método de estabilización	Tratamiento con cal ($Ca(OH_2)$), digestión anaerobia, etcétera.

Elementos traza, metales pesados y micronutrientes

Los elementos traza que contienen los lodos incluyen metales pesados debido principalmente a las descargas industriales donde se generan a

través de los procesos ya sea de lavado de equipo o del producto, en las descargas comerciales y residenciales, esta última debido a los cambios en los materiales de uso doméstico así como a los residuos de alimentos que se liberan al sistema de alcantarillado.

pH

El pH de la mayoría de los lodos se encuentra generalmente en un intervalo entre 7 y 8, a menos que se les adicione cal u otro producto alcalino durante el tratamiento del agua residual con lo que se incrementaría el pH y de esta manera se tendría un mayor control de microorganismos patógenos.

Nutrientes

Los nutrientes son tal vez la característica más importante de los lodos, debido a su alto contenido de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) que les da un gran valor como fertilizantes del suelo. Otros macronutrientes presentes en los lodos son el calcio (Ca), el magnesio (Mg) y el hierro (Fe) (Epstein, 2002).

Olor

El olor determina su aceptabilidad. Para medirlo se emplea un olfatómetro dinámico que se permite efectuar mediante mediciones en campo. El olor en los lodos se debe, en la mayor parte de los casos, a la presencia de ácido sulfhídrico (Jiménez, 2001).

3.1.4.3 Propiedades biológicas de los lodos

Las dos principales características biológicas de los lodos son los microorganismos y la materia orgánica.

Microbiología

Los lodos residuales suelen contener una gran variedad de microorganismos patógenos y nativos, estos últimos tienen la cualidad de

mejorar la biota del suelo la cual es indispensable para la descomposición de la materia orgánica y para enriquecer las propiedades físicas del suelo. La población de microorganismos nativos está conformada por bacterias, hongos, actinomicetos y protozoarios.

Materia orgánica

El contenido de materia orgánica en un suelo es de vital importancia ya que incrementa la capacidad de retención de agua, reduce la densidad volumétrica, aumenta la capacidad de intercambio catiónico y fortalece las raíces de las plantas, además de mejorar las propiedades físicas del suelo (Epstein, 2002).

3.2 Tratamiento de lodos

La mayoría de los biosólidos reciben un tratamiento en el sitio antes de ser usados o dispuestos gracias a las normas que protegen a la salud pública y al ambiente, así como para facilitar su manejo y reducir costos. De los biosólidos a los que se les da tratamiento, sólo los que cumplen con los requerimientos de las normas respecto a patógenos, atracción de vectores y contenido de metales pesados, pueden ser usados por ejemplo, como composta o ser aplicados al campo.

Cuando se habla de costos y manejo, el contenido de agua en los biosólidos puede afectar aspectos como su transporte, el tamaño del tratamiento y las operaciones de uso o disposición de los mismos.

Algunos de los tratamientos reducen el volumen de masa de los biosólidos (como los procesos de digestión), mientras otros lo incrementan (como la adición de productos alcalinos). Los dos tipos más comunes de tratamiento son la estabilización y la deshidratación.

La estabilización se refiere a un número de procesos que reducen los niveles de microorganismos patógenos, de olor y de sólidos volátiles en los lodos, con el fin

de ser posteriormente aprovechados para otros usos o para su disposición final. Entre los métodos más comunes de estabilización se encuentran la alcalina, la digestión aerobia y anaerobia, el composteo y/o el secado por calor.

La deshidratación consiste en remover el exceso de agua de los biosólidos y se aplica antes de su composteo, disposición final en rellenos sanitarios, secado o incineración. Existen varios métodos de deshidratación, entre los que se incluyen la centrífuga, el filtro de banda, el filtro prensa (EPA, 1999).

3.2.1 Estabilización biológica de lodos

Digestión anaerobia

La digestión anaerobia involucra la estabilización de los lodos por medios biológicos en un tanque cerrado para reducir el contenido orgánico, volumen, olor (incluyendo el potencial para generar olores), y patógenos que caracterizan a los biosólidos. En este proceso las bacterias anaerobias consumen la materia orgánica de los biosólidos convirtiéndola en dióxido de carbono (CO_2), metano[2], y amoniaco a una temperatura de alrededor de 35ºC, pero también se puede operar a temperaturas superiores a los 55ºC para permitir una mayor reducción de sólidos y patógenos en los biosólidos.

La digestión anaerobia es uno de los procesos más comúnmente usados para la estabilización de lodos, especialmente en las plantas de tratamiento de gran capacidad, en parte debido a la posibilidad de recuperar el metano.

Digestión aerobia

La digestión aerobia es otro método de estabilización biológica donde las bacterias aerobias[3] se desarrollan en digestores ya sean abiertos o cerrados o en lagunas, convirtiendo la materia orgánica a dióxido de carbono, agua y nitrógeno; en el proceso se reducen los microorganismos patógenos y los olores (incluyendo el potencial para generar olores). La

[2] El metano puede ser usado como fuente de energía.
[3] Las bacterias aerobias son aquellas que pueden vivir en ambientes oxigenados.

digestión aerobia puede llevarse a cabo a altas temperaturas de operación (alrededor de los 55ºC). Este método ha vuelto cada vez más popular gracias a que se produce un biosólido con niveles bajos de patógenos y alto contenido de sólidos (EPA, 1999).

Composteo

El composteo es la descomposición de la materia orgánica por los microorganismos en un ambiente controlado por el tamaño y porosidad de la pila, que además facilita el incremento de la temperatura (de entre 55 y 60ºC) para la destrucción de los microorganismos patógenos. Los niveles de humedad y oxígeno también son controlados para evitar los malos olores. Durante el proceso de descomposición, los biosólidos son degradados a humus que es un excelente acondicionador del suelo a un intervalo de pH de 6.5 a 8, además que permite el sano crecimiento de las plantas y reduce la movilidad de los metales.

Para la estabilización del lodo, este se debe mezclar con un agente abultante[4] que es una muy buena fuente de carbono. Inicialmente, tanto la masa de biosólidos como la porosidad se incrementan debido al agente abultante, al igual que disminuye el contenido de humedad.

Dependiendo del método que se use, los lodos pueden ser composteados de 3 a 4 semanas.

3.2.2 Estabilización física de lodos

Secado por calor

El secado con calor usa secadores pasivos o activos para evaporar el agua de los biosólidos (en algunos lugares se usan secadores solares), de esta manera los microorganismos patógenos son destruidos y se elimina una gran cantidad de humedad reduciendo de manera importante el volumen de

[4] Puede ser aserrín, residuos de poda municipales, corteza, cáscara de arroz, paja, o material previamente composteado.

biosólidos. Este proceso permite que los biosólidos conserven el nitrógeno y representa ahorros significativos en los costos de transporte por encima de la composta u otras formas de biosólidos con alto contenido de humedad (EPA, 1999).

3.2.3 Estabilización química de lodos

Ozono

El proceso de desinfección con ozono implica acidificar el lodo con ácido sulfúrico y posteriormente tratar con ozono por una hora bajo condiciones de presión. Después se despresuriza y se trata con ácido nítrico por 2 horas (EPA, 2003). El ozono se opera en un reactor semi-batch en donde el lodo es espesado simultáneamente y luego es drenado fuera del mismo. Este modo de operación, permite una reducción de la cantidad de lodo por encima del 40%, dependiendo de la dosis de ozono (Ahn *et al*., 2002). El deshidratado también se mejora con la ozonación.

Cloro

El uso de cloro como acondicionador químico, difiere en gran manera de los métodos tradicionales tales como la digestión biológica o la estabilización por calor, ya que la reacción por la adición de cloro ocurre de manera instantánea, hay muy poca reducción de sólidos volátiles, y algo del material orgánico del lodo puede decomponerse y formar nitrógeno y dióxido de carbono. El biosólido estabilizado con cloro se caracteriza por tener un pH que varía entre 2.5 y 4.5, olor a cloro, y un color café claro (W.P.C.F., 1988).

Estabilización ácida

La estabilización vía ácida de un lodo, consiste en la adición de ácidos como acético, láctico, málico, cítrico, tartárico, clorhídrico y sulfúrico (son estos dos últimos los más eficientes en términos generales para la inactivación de las bacterias) para obtener un pH de 3.0 y una reducción de olores significativa (Roth y Keenan, 1971).

Estabilización alcalina

La estabilización alcalina consiste en la adición de compuestos químicos alcalinos al lodo residual con el fin de aumentar su pH e inactivar o destruir los microorganismos patógenos (Jiménez, 2001). Los gases producidos durante la descomposición anaerobia de la materia orgánica contienen principalmente nitrógeno y sulfuro que son los principales responsables del olor desagradable del lodo, cuando se le adiciona algún producto alcalino, los microorganismos involucrados en la descomposición son destruidos o inhibidos en un ambiente altamente básico. Las características físicas y químicas del biosólido también se ven alteradas debido a las reacciones que ocurren con el reactivo (Turovskiy, 2006).

Para cumplir con los requerimientos de estabilización y obtener un lodo clase B de acuerdo con la norma, el pH de la mezcla debe ser elevado por encima de 12 por un tiempo de 2 horas y se debe de mantener en un pH mayor a 11.5 por 24 horas de tal manera que se reduzca la atracción de vectores, es por esto que el factor más importante para lograr este objetivo es además del pH, el tiempo de contacto. El decaimiento del pH en el lodo estabilizado es causado por el dióxido de carbono atmosférico que es absorbido regularmente por el biosólido. Debido a que el CO_2 es un ácido débil, va bajando paulatinamente el pH hasta alcanzar un valor por debajo de 11 que es donde ocurre la reactivación de bacterias y por lo tanto se producen ácidos orgánicos que causan una disminución aún más dramática del pH. El incremento de pH en el biosólido debe estar asegurado con una

alcalinidad residual que mantenga un pH elevado para el almacenamiento del producto.

Por otra parte si se quiere obtener un lodo clase A, además de elevar el pH se deben aplicar altas temperaturas (70ºC por 30 minutos). Tan pronto como el pH se estabiliza en un rango de 10 a 10.5, la actividad microbiana y el mal olor se ven dramáticamente reducidos o eliminados.

La cal viva (CaO) y la cal hidratada ($Ca(OH)_2$) son los productos químicos más comúnmente usados, sin embargo, han ido surgiendo un gran número de nuevas tecnologías de estabilización alcalina en los que se usan otros productos químicos ya sea como complemento de la cal o en lugar de ella como por ejemplo el hidróxido de sodio (NaOH). También se ha innovado en el uso de equipo especial o en la creación de nuevas etapas de proceso. Toda esta nueva tecnología trae consigo una gran ventaja sobre la estabilización tradicional con cal, incluyendo un mejor control de patógenos y una mayor aceptación pública del uso del producto final, al cual se le ha dado el nombre de “suelo artificial”, debido a su exitoso uso como sustituto de suelo (WEF, 1995).

Existen varias tecnologías de estabilización, las cuales se pueden agrupar en tres métodos:

- Preestabilización: en este método se utiliza el producto alcalino en solución, el cual es mezclado con el lodo líquido para producir un biosólido clase B. Este es un sistema de tratamiento por lotes en el que la mezcla lodo/álcali se deja reaccionar en el tanque de estabilización por alrededor de 2 horas. Debido a las grandes cantidades de biosólido líquido que debe ser transportado a los sitios de disposición final, este tratamiento es recomendable para plantas pequeñas con la adición de otros acondicionadores como polímeros, sulfato de aluminio o sales de hierro, o

bien, incluir un equipo de deshidratado de lodos tales como filtros de vacío o filtros prensa.

Para la estabilizar el lodo con el álcali en solución se requiere más producto por unidad de lodo sólido que el requerido si se quisiera desaguar, ya que para asegurar un pH de 12 por dos horas sin reaparición de microorganismos, es necesario adicionar un exceso del reactivo.

- Post-estabilización: en este método el producto químico alcalino se adiciona seco a la torta de lodo deshidratado para aumentar el pH de la mezcla. Este proceso requiere de un mezclado adecuado para homogenizar y evitar aglomerados de material putrefacto, para lo cual se utilizan mezcladores rotatorios. El lodo estabilizado tiene una textura granular o como migajón, dependiendo de la cantidad de humedad que contenga la torta y puede ser almacenado por largos periodos de tiempo o ser aplicado al suelo. Una de las ventajas de este método es que no requiere el uso de agua adicional a la contenida en el lodo (a comparación del método preliminar).

- Tecnología de estabilización alcalina avanzada: este método tiene que ver con aquellas tecnologías que han modificado la estabilización tradicional alcalina, haciendo uso de otros materiales como el cemento y la cal en polvo de horno, cemento Pórtland o ceniza; sin embargo la modificación más frecuente es la de implantar secadores complementarios y la adición de compuestos químicos o agentes floculantes. La gran mayoría de estas tecnologías de estabilización alcalina avanzada se encuentran patentadas y solo se puede disponer de ellas a través de las compañías privadas (Turovskiy, 2006).

Algunos de los productos usados para la estabilización de los lodos son:

Cal

La cal es el producto más comúnmente usado y uno de los materiales alcalinos menos costosos. Existen dos tipos de cal: la cal viva (óxido de calcio) y el hidróxido de calcio. Los principios de aplicación de estos materiales son los mismos tanto para el hidróxido como para el óxido de calcio cuando se encuentran en solución, sin embargo la elección en el momento de usar cualquiera de los dos, está basada en las características económicas y de manejo ya que los costos de producción y de transporte del hidróxido de calcio son de aproximadamente el 30% más que los costos de la cal viva. Generalmente el uso del hidróxido de calcio es más económico en lo que respecta a su uso en pequeñas instalaciones; sin embargo, cuando se requiere una cantidad de entre 3 y 4 Ton/d es recomendable el uso de cal viva.

Las dosis requeridas de los productos químicos alcalinos, dependen del tipo de lodo que se va a tratar (lodos primarios, activados, percolados, fisicoquímicos), de su calidad y composición química (incluyendo el contenido de materia orgánica) y de la concentración de sólidos, así como de la calidad y del tipo del producto alcalino que se va a usar. En la tabla 3.3 se muestran algunas dosis de cal en solución requeridas para mantener el lodo a un pH de 12 por 30 minutos (EPA, 1979).

Tabla 3.3. Dosis de cal requerida para estabilización de lodos en Lebanon, Ohio[5] (Adaptado de la WEF, 1995).

Tipo de lodo	Concentración % sólidos	Dosis, kg[$Ca(OH)_2$]/kg sólido seco	pH promedio	
			Inicial	Final
Primario	4.3	0.054	6.7	12.7
Activado	1.3	0.136	7.1	12.6
Digerido anaeróbicamente	5.5	0.086	7.2	12.4

Hidróxido de sodio

El hidróxido de sodio (NaOH), también conocido como sosa cáustica, es una masa blanca, opaca, quebradiza y de estructura fibrosa. En el agua se disuelve con fuerte desprendimiento de calor y expuesta al aire es delicuescente[6], si absorbe el anhídrido carbónico atmosférico se transforma en carbonato sódico. Su solubilidad aumenta con la temperatura: a 0ºC es de 42 g; a 80ºC es de 313 g NaOH/100 g de agua (Winnacker y Weingaertner, 1954). Las sales del NaOH pueden contener 4, 3.5, 1 ó ningún hidrato, cuyas solubilidades van de 42 g NaOH/100 g agua a 0 ºC a 347 g NaOH/100 g agua a 100ºC (Perry *et al.,* 1996).

3.2.4 Deshidratación de lodos y biosólidos

La idea de disminuir el contenido de humedad de los lodos y biosólidos en el sitio de su generación, surgió debido a varias razones:

1. El costo de transportar los lodos y biosólidos al sitio de disposición final es sustancialmente menor cuando se reduce su volumen por medio de la deshidratación.

[5] Dosis requerida para mantener un pH de 12 por 30 minutos
[6] Que absorbe la humedad del aire y se disuelve en ella.

2. Los lodos y biosólidos deshidratados, son más fáciles de manejar que los que están solo espesados o se encuentran aún en estado líquido.
3. La deshidratación se utiliza generalmente antes de la incineración del lodo para incrementar su valor calorífico.
4. La deshidratación se utiliza antes del composteo, para reducir los requerimientos de agentes abultantes.
5. En algunos casos, remover el exceso de humedad de los lodos, evita los malos olores y retrasa el proceso de descomposición de los mismos.
6. La deshidratación se utiliza como un pretratamiento para los lodos antes de ser dispuestos en el relleno sanitario para evitar que se formen lixiviados.

Existen varias técnicas para deshidratar los lodos y biosólidos, algunas de estas dependen de la evaporación natural y de la filtración. Los dispositivos mecánicos de deshidratación utilizan principios físicos tales como filtración, prensado, exprimido, la acción capilar y la separación por centrífuga para desecar más rápidamente los lodos y biosólidos entre estos procesos se encuentran la centrífuga, el filtro de banda, el filtro prensa y los lechos y lagunas de secado.

- Centrífugas: el proceso de centrifugación es ampliamente usado en la industria para la separación de líquidos de diferentes densidades, la remoción de sólidos y para su espesamiento, Existen dos tipos de centrífugas: la centrífuga de tazón sólido y la centrífuga de alta tasa de sólidos.

- Filtro de banda: el filtro de banda requiere de un acondicionamiento químico, una filtración por gravedad y de la aplicación de presión mecánica para deshidratar el lodo, además, ha probado ser muy efectivo para casi todos los tipos de lodos y biosólidos provenientes del tratamiento de las aguas residuales municipales.

- Filtro prensa: en un filtro prensa, el lodo es deshidratado gracias a la aplicación de altas presiones, lo cual obliga al agua a separarse de los sólidos produciendo una torta con alta concentración de lodo seco y un filtrado bastante claro. Algunas de las desventajas del filtro prensa, incluyen los altos costos de químicos y de mantenimiento, la alta complejidad mecánica y la relativamente corta vida de la tela del filtro. Entre los tipos de filtro prensa más usados se encuentran el de volumen constante y el de volumen variable.

- Lechos de secado: los lechos de secado se utilizan comúnmente para deshidratar biosólidos digeridos y lodos sedimentados procedentes de plantas de tratamiento con procesos de lodos activados de aireación extendida que no hayan tenido un espesamiento previo. Sus principales ventajas son los bajos costos de inversión y mantenimiento, así como la obtención de un biosólido con una alta concentración de sólidos, sin embargo, su aplicación requiere de una gran cantidad de terreno, buenas condiciones climáticas para el secado del biosólido e intensas labores para la recolección del producto seco. Existen cinco tipos de lechos de secado: el lecho de arena convencional, el pavimentado, de medio artificial, el de vacío asistido y el solar.

- Lagunas de secado: las lagunas de secado pueden ser usadas como sustituto de los lechos de secado en la deshidratación de biosólidos digeridos, sin embargo no funcionan muy bien con lodos sin pretratamiento debido a su alto potencial de malos olores. El buen funcionamiento de este método se ve afectado por el clima, la precipitación y las bajas temperaturas que impiden la correcta evaporación del agua contenida en los biosólidos. La remoción de los biosólidos ya deshidratados y con un 25 a 30 % de sólidos, se lleva a cabo de manera mecánica.

3.2.5 Secado de lodos y biosólidos

El secado de lodos y biosólidos, involucra la aplicación de calor para evaporar el agua y reducir el contenido de humedad a un nivel por debajo del logrado por los métodos convencionales de deshidratación, sus ventajas incluyen los bajos costos de transportación, la reducción de microorganismos patógenos, mayor capacidad de almacenamiento y la obtención de un producto comercializable.

Los dispositivos de secado por calor se encuentran clasificados como:

- Secadores directos: los cuales son usados para el secado de lodos residuales municipales, y se encuentran conformados por el secador de flash, el secador rotatorio, y el de lecho fluidizado donde el primero consiste en la pulverización del lodo por medio de un molino en presencia de aire caliente; en el segundo, los lodos que van a ser tratados, se mezclan con la torta de sólido ya secado en un sistema de rodillos rotatorios que a su vez se mezclan con aire caliente para obtener un lodo seco; finalmente, el secador de lecho fluidizado, maneja el mismo principio del secador rotatorio, pero en lugar de secar el lodo con aire caliente, tiene una caldera de vapor y un reactor de lecho fluidizado a una temperatura de 120ºC.

- Secadores indirectos: estos dispositivos son diseñados tanto horizontal como verticalmente. Los secadores horizontales emplean canales, aletas o discos para transportar a los biosólidos a través del secador, en donde un medio caliente ya sea vapor o aceite, circula a través del armazón y calienta el lodo por conducción evaporando el agua contenida en los mismos. En los secadores verticales, el lodo es alimentado por la parte superior del dispositivo, y de la misma manera que en el horizontal, el lodo se calienta por el contacto con la superficie del metal caliente mientras va cayendo en un movimiento de zig-zag hacia el fondo del secador (Tchobanoglous, 2004).

3.3 Disposición final de lodos y biosólidos

Entre los sitios de disposición final de los biosólidos, se encuentra su aplicación en el campo, la incineración y en superficies y rellenos sanitarios.

3.3.1 Aplicación de biosólidos en el campo

La aplicación de biosólidos al campo, consiste en esparcirlos sobre la superficie del suelo o incorporarlos o inyectarlos dentro del mismo. Este puede ser usado como enriquecedor o como sustituto de fertilizantes comerciales debido a su contenido de nutrientes como nitrógeno y fósforo; de micronutrientes incluyendo las trazas de metales pesados como el cobre, calcio, boro, molibdeno, zinc, magnesio, hierro, y el manganeso; y de materia orgánica lo que hace que este producto sea benéfico para la producción agrícola, la jardinería, la silvicultura, el crecimiento del césped u otro tipo de vegetación.

Aunque los biosólidos generalmente tienen un menor contenido de nutrientes con valores típicos de 3.2% de nitrógeno, 2.3% y 0.3% de potasio que los fertilizadores comerciales cuyos porcentajes fluctúan entre 5 y 10% de nitrógeno, 10% de fósforo y de 5 a 10% de potasio (Metcalf & Eddy, 1991), su uso acondiciona el suelo y reduce o elimina la necesidad de adquirir fertilizantes comerciales, de tal manera que se reduce el impacto a causa de los altos niveles de nutrientes introducidos al ecosistema. Ahora, si bien es cierto que tanto los biosólidos como los fertilizantes contienen metales, es solo en los primeros en donde se han regulado las concentraciones de estos elementos mientras que a los segundos se les han comenzado a realizar estudios recientemente.

Entre los tratamientos que se le dan a los biosólidos antes de su aplicación al campo se pueden incluir la digestión, el composteo, la estabilización alcalina, el tratamiento con calor y otros métodos, sin embargo, es el nivel de tratamiento el que define su uso o disposición final, por ejemplo, en algunos casos, la aplicación

de estos al suelo es menos costoso que disponerlos en un sitio con esta función. Es importante entender que si bien estos sedimentos composteados, implican costos en su realización, también conllevan una amplia variedad de usos, son fáciles de almacenar y de aplicar gracias a que es un producto con poca humedad y olor y tiene una alta calidad.

Los biosólidos deshidratados o líquidos pueden ser aplicados a la superficie del suelo por esparcimiento gracias a métodos como los difusores, las pipas o vehículos especiales y en el caso de los líquidos, pueden ser aplicados por inyección al subsuelo. Una vez que se encuentren esparcidos en el suelo y se han secado parcialmente, se procede a su incorporación en el suelo por medio del arado (EPA, 1999).

3.3.2 Incineración de biosólidos

La incineración consiste en introducir los biosólidos en un dispositivo de combustión a altas temperaturas y quemar la materia orgánica volátil en presencia de oxígeno, este proceso destruye los sólidos volátiles, los microorganismos patógenos y degrada la mayoría de los productos químicos orgánicos tóxicos así como también forma dioxinas, y otro productos causados por la combustión incompleta además de gases que contienen metales y que deben ser controlados debido a su toxicidad. Los biosólidos son reducidos a un residuo que está formado principalmente por cenizas que representan aproximadamente el 20% del volumen inicial y metales los cuales no pueden ser degradados en el proceso. Las cenizas pueden ser dispuestas en rellenos sanitarios, o bien ser utilizadas como agregados en la producción de materiales como el concreto, o como mejoradores de suelo.

Existen varios tipos de incineradores, entre los más comunes se encuentran los de chimenea múltiple y los de lecho fluidizado el cual se distingue por tener menos problemas con las emisiones que el primer horno mencionado, lo anterior debido a

que tiene una tecnología más avanzada que le permite realizar una combustión más uniforme de los biosólidos. El control de gases, dioxinas, entre otros es llevado a cabo por scrubbers húmedos, precipitadores electrostáticos secos y húmedos, filtros de tela (para el control de partículas) y post-quemadores (para el control de material orgánico parcialmente quemado).

La incineración de biosólidos se utiliza comúnmente en zonas con escaso territorio o cuando por sus características no pueden ser utilizados como mejoradores de suelo (EPA, 1999).

3.3.3 Rellenos sanitarios

La disposición de biosólidos en mono-rellenos[7] se encuentra regulada por la EPA en el apartado 503 del CFR 40, y en rellenos sanitarios con residuos sólidos municipales en el apartado 258 del CFR 40 (EPA, 1994). Dependiendo de las leyes locales o del estado, los biosólidos deben ser estabilizados antes de su disposición y es recomendable que sean deshidratados para reducir su volumen (y así ahorrar en costos y facilitar su transporte) y evitar la generación de lixiviados en el relleno. En muchas ocasiones, la concentración de sólidos es un factor vital para determinar la factibilidad de los biosólidos en el sitio.

Es recomendable depositar los biosólidos en los rellenos sanitarios de residuos municipales, cuando además de estos se quiere disponer de otro tipo de escorias como arenas, productos remanentes del filtrado, entre otros que se generan en el tratamiento de aguas.

En un relleno sanitario regulado, los residuos se depositan en un área determinada, son compactados con un tractor y cubiertos con una capa de 350 mm de espesor de suelo limpio, para al siguiente día recibir la carga del nuevo

[7] Rellenos exclusivos para la disposición final de un solo tipo de residuo, en este caso de biosólidos.

residuo, con lo que los malos olores y la dispersión de partículas por el viento se ven minimizados (Tchobanoglous, 2004).

3.4 Normatividad de los lodos y biosólidos en México

En México los lodos y biosólidos se encuentran regulados bajo la norma de protección ambiental NOM-004-SEMARNAT-2002, especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. Según dicta la norma, los lodos por sus características propias o adquiridas después de un proceso de estabilización pueden ser susceptibles de aprovechamiento siempre y cuando cumplan con los límites máximos permisibles de contaminantes establecidos en la norma o, en su caso se dispongan en forma definitiva como residuos no peligrosos.

Los límites máximos permisibles que reporta la norma se encuentran concentrados en las tablas como sigue:

Tabla 3.4. Límites máximos permisibles para metales pesados en biosólidos

Contaminante	Excelentes mg/kg en base seca	Buenos mg/kg en base seca
Arsénico	41	75
Cadmio	39	85
Cromo	1 200	3 000
Cobre	1 500	1200
Plomo	300	840
Mercurio	17	57
Níquel	420	420
Zinc	2 800	7 500

Tabla 3.5. Límites máximos permisibles para patógenos y parásitos en lodos y biosólidos.

Clase	Indicador bacteriológico de contaminación	Patógenos	Parásitos
	Coliformes fecales NMP/g en base seca	*Salmonella spp.* NMP/g en base seca	Huevos de Helmintos/g en base seca
A	Menor de 1 000	Menor de 3	Menor de 1 (a)
B	Menor de 1 000	Menor de 3	Menor de 10
C	Menor de 2 000 000	Menor de 300	Menor de 35

(a) Huevos de Helmintos viables

El aprovechamiento de los biosólidos, se establece en función del tipo y clase, como se especifica en la tabla 3.6 y su contenido de humedad debe ser del 85%.

Tabla 3.6. Aprovechamiento de biosólidos

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

4 Metodología

En esta sección se describen las técnicas utilizadas para determinar las características de los lodos residuales de la Planta de Tratamiento de la UAM-Azcapotzalco, así como los métodos para su estabilización. En este capítulo se presentan las siguientes etapas:

1.- Muestreo de lodos
2.- Caracterización de los lodos
3.- Estabilización alcalina de lodos residuales
4.- Generación de lodos en la planta piloto

4.1 Muestreo de lodos

El muestreo se realizó en el tanque de estabilización de lodos (figura 2) en la planta de tratamiento de aguas residuales de la UAM-Azcapotzalco, la cual utiliza un tratamiento físico-químico para tratar las aguas residuales producidas por la comunidad universitaria. Para la precipitación de los sólidos suspendidos del agua, se utiliza el sulfato de aluminio como coagulante y un polímero aniónico como auxiliar en el proceso de coagulación-floculación, por lo que los lodos generados se les llaman “lodos de aluminio”.

El procedimiento consistió en la purga de lodos cada hora por un lapso de 5 minutos a un flujo moderado durante todo el día de operación de la planta (7 horas) de tal manera que no se formen vórtices en el sedimentador.

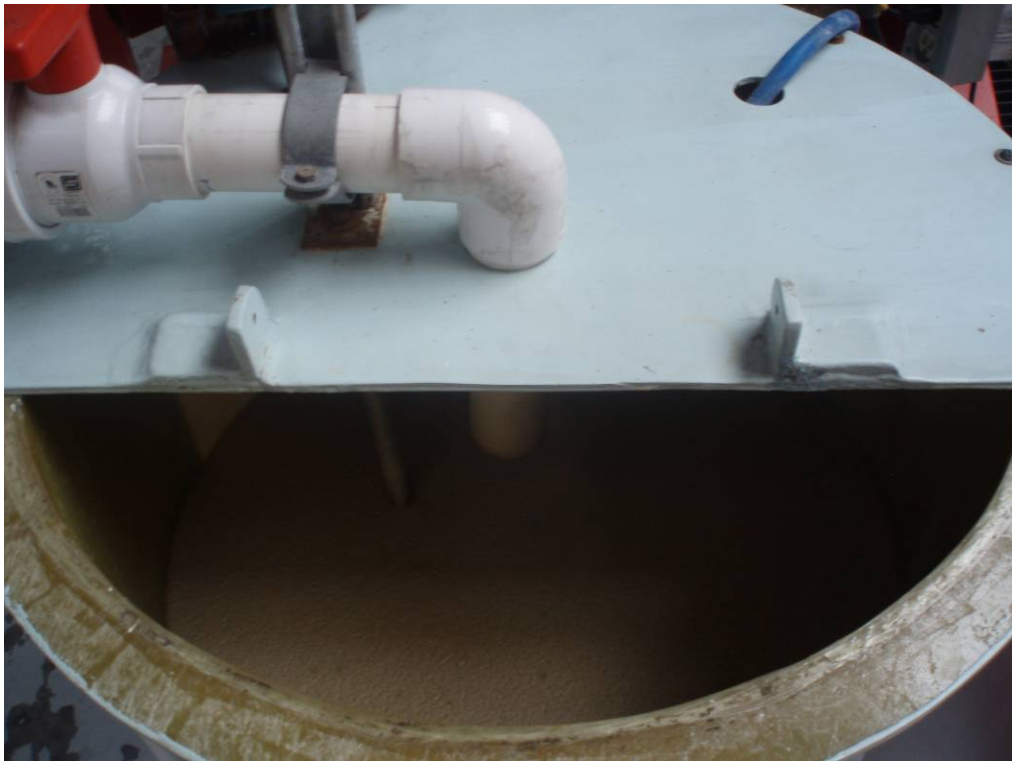

Figura 3.2. Tanque de estabilización de lodos

Después de la homogenización del tanque, se procedió a la tomar muestras en envases de plástico de 5 litros y posteriormente realizar las pruebas correspondientes.

4.2 Caracterización de los lodos

Para la caracterización de los lodos, se realizaron las siguientes pruebas, de acuerdo a la NOM-004-SEMARNAT-2002:

4.2.1 pH

El método para medir el pH en residuos y sólidos se encuentra descrito en la EPA 9045C. En este método la muestra (que puede presentarse como sólido, lodo o líquido no acuoso) es mezclada con agua destilada (biosólidos tratados con NaOH) o con cloruro de calcio ($CaCl_2$, para biosólidos tratados con $Ca(OH)_2$)de

modo que quede en solución y se le pueda medir posteriormente el pH (EPA, 2004).

4.2.2 Sólidos totales y materia orgánica

El principio de este método se basa en la medición cuantitativa de los sólidos y sales disueltas así como la cantidad de materia orgánica contenidos en aguas naturales y residuales, mediante la evaporación y calcinación de la muestra filtrada o no, en su caso, a temperaturas específicas, en donde los residuos son pesados y sirven de base para el cálculo del contenido de estos (NMX-AA-034-SCFI-2001).

4.2.3 Sólidos volátiles

Este procedimiento consiste en determinar la cantidad de materia orgánica e inorgánica susceptible a ser calcinada a 550ºC durante 15 a 20 minutos, tiempo durante el cual se debe dejar enfriar la muestra y pesar hasta obtener peso constante. Los resultados de los sólidos volátiles se expresan en base al peso seco (NMX-AA-034-SCFI-2001).

4.2.4 Coliformes fecales

El principio de este método consiste en la homogenización de la muestra por agitación y en la obtención de inóculos a través de diluciones sucesivas para posteriormente filtrar a través de una membrana y cuantificar el crecimiento de las colonias en el medio de cultivo (NOM-004-SEMARNAT-2002).

4.2.5 Salmonella spp.

Este método se basa en la utilización de medios selectivos con sustancias inhibidoras, que favorecen el crecimiento de *Salmonella spp*., e impiden el desarrollo de bacterias coliformes asociadas. La aplicación de pruebas bioquímicas permiten conocer el perfil bioquímico de las cepas en estudio para

compararlo con las cepas que generalmente se exhiben del género *Salmonella spp*. Su cuantificación se lleva a cabo por tablas de Número Más Probable (NMP) (NOM-004-SEMARNAT-2002).

4.2.6 Huevos de Helmintos

Este método consiste en la concentración de la muestra a través de lavados continuos, donde combinados con diversas etapas de filtración y flotación se logra la separación de los huevos de Helmintos del resto de las partículas de mayor y menor tamaño, de tal manera que puedan ser observadas en el microscopio (NOM-004-SEMARNAT-2002).

4.2.7 Metales pesados

El presente método se realiza para la determinación de aluminio (Al), arsénico (As), cadmio (Cd), cobre (Cu), cromo (Cr), plomo (Pb), mercurio (Hg), níquel (Ni) y Zinc (Zn), en muestras de biosólidos, por espectrofotometría de absorción atómica, donde el análisis de los elementos se efectúa individualmente y en el siguiente orden:

- Se realiza una digestión ácida por microondas del biosólido por el método EPA 3051A (EPA, 2007).

- Se aplica el método de arrastre de vapor para determinar mercurio, de generación de hidruros para arsénico y de espectrometría de absorción atómica por flama (aspiración directa) para el resto de los metales.

- Se aplican los siguientes métodos EPA para cada uno de los metales que se van a determinar (EPA, 1996):

Tabla 3.7. Métodos EPA para determinar metales pesados

Metal	Método EPA
Aluminio	7020
Arsénico	7061
Cadmio	7130
Cobre	7210
Cromo	7190
Plomo	7420
Mercurio	7471
Níquel	7520
Zinc	7950

4.3 Estabilización alcalina de lodos residuales

Para la estabilización de los lodos residuales de la planta de tratamiento, se emplearon dos productos químicos alcalinos, la cal ($Ca(OH)_2$) y la sosa cáustica (NaOH).

La estabilización de los lodos se llevó a cabo en dos etapas, la primera con el objetivo de determinar dosis experimentales de los compuestos activos necesarias para llegar a un pH de 12 y la segunda, aplicar estas cantidades en distintas proporciones (baja, media y alta) respecto a la cantidad de sólidos totales del lodo, con el fin de obtener una dosis adecuada para la estabilización de los mismos.

Estos experimentos se realizaron de la siguiente manera:

4.3.1 Estabilización por etapas

En esta sección se presentan las etapas en las que se dividió la experimentación.

4.3.1.1 1ª Etapa de la determinación de la dosis

Para determinar las dosis experimentales de hidróxido de calcio e hidróxido de sodio, se le adicionó a un volumen de lodos (100 mL) una alícuota (0.2 mL) de una

solución con una concentración de 150,000 mg/L de $Ca(OH)_2$ comercial (o dado el caso de NaOH comercial) a un cierto tiempo de retención y en constante agitación.

Después de un tiempo determinado de agitación (1.5, 3 y 5 minutos), se les midió el pH con un medidor multiparámetro modelo sensION 156 marca HACH, siguiendo el siguiente criterio:

- Si pH < 12 entonces adicionar una alícuota del agente alcalino.
- Si pH > 12 entonces finalizar la prueba.

4.3.1.2 2ª Etapa determinación de la dosis

Una vez obtenidas las curvas de estabilización a diferentes tiempos, se toman las dosis bajas, medias y altas promedio las cuales se adicionan en proporción a 1 L de lodos. Después de 2 horas de agitación, se midió el pH final, para posteriormente, filtrar la muestra en un dispositivo de filtración de residuos peligrosos Millipore para filtros de disco de 142 mm.

Para el control del pH, éste se les midió a cada una de las muestras a las 24 horas y finalmente a los 7 días en estado sólido.

4.4 Generación de lodos en la planta piloto

Para la cuantificación de la generación diaria de lodos producidos durante 12 horas de operación de la planta piloto, estos fueron transferidos (ya concentrados y compactados por el peso de la gravedad dentro del sedimentador) al tanque de estabilización a razón de 0.11 L/s para evitar que se formaran vórtices, y el lodo quedara rezagado en las paredes de la base del sedimentador de modo que pudiera haber una afectación en la lectura.

5 Resultados

5.1 Caracterización de lodos

Para la caracterización de los lodos previos a la estabilización (crudos) se tomaron en cuenta parámetros físicos y químicos, y se obtuvieron los resultados en la tabla 5.1.

Tabla 5.1. Caracterización de lodo crudo

Parámetro	Unidades	Valor
pH	Unidades de pH	7.0 ± 0.24
Sólidos totales	mg/L	8 917 ± 2 428
Sólidos volátiles	mg/L	4 780
Coliformes fecales	UFC/mL de dilución	$14.5/10^{-5}$ $1.5/10^{-6}$
Salmonella spp.	NMP/g base seca	460
Huevos de Helmintos	HH/g base seca	0
Materia orgánica	%	33.78 ± 1.16

NMP = Número Más Probable
UFC = Unidades Formadoras de Colonias

Respecto a las características organolépticas, el lodo procedente del tratamiento físico-químico presenta un color de café a amarillo, olor poco desagradable y es fácil de secar.

5.2 Caracterización de biosólidos

Resultados obtenidos de la estabilización de lodos con dos productos químicos alcalinos (NaOH y $Ca(OH)_2$) de acuerdo a los parámetros físicos, químicos y biológicos establecidos en la NOM-004 y su relación con los Límites Máximos Permisibles (ver tabla 5.2).

Tabla 5.2. Características físico químicas y biológicas de los biosólidos

Parámetro	Unidades	Estabilizados con NaOH			Estabilizados con $Ca(OH)_2$			Límite Máximo Permisible
		Dosis baja	Dosis media	Dosis alta	Dosis baja	Dosis media	Dosis alta	
pH*	Unidades de pH	10.37 ± 0.878	12.07 ± 0.813	12.72 ± 0.457	10.39 ± 0.544	12.30 ± 0.293	12.46 ± 0.169	pH ≥ 12 por 2 horas pH ≥ 11.5 por 24 horas
Sólidos Totales	mg/L	10 380[+]	12 470[+]	14 780[+]	14 407 ± 501	23 480 ± 689	125 670	NR
Sólidos volátiles	mg/L	4 060[+]	3 210[+]	2 710[+]	5 210	6 380	105 380	NR
Coliformes fecales	UFC/mL	No detectado			No detectado			Clase A: Menor de 1 000 Clase B: Menor de 1 000 Clase C: Menor de 2 000 000
Salmonella spp.	NMP/g base seca	No detectado			No detectado			Clase A: Menor de 3 Clase B: Menor de 3 Clase C: Menor de 300
Huevos de Helmintos	HH/g base seca	No detectado			No detectado			Clase A: Menor de 1[&] Clase B: Menor de 10 Clase C: Menor de 35

NR = No Reportado
UFC = Unidades Formadoras de Colonias
[&]Huevos de Helmintos viables
[+]Duplicado en donde se saca el promedio
*pH tomado a las 2 horas de la adición del producto químico alcalino

De igual forma, se determinaron las concentraciones de metales pesados en una muestra de biosólidos, y se obtuvieron los resultados que se muestran en la tabla 5.3.

Tabla 5.3. Concentración de metales pesados en los biosólidos

Metal	Concentración (mg/kg)	Límite Máximo Permisible (mg/kg)		Concentración en biosólidos (Cárdenas, 2002).
		Excelentes	Buenos	
Aluminio	54 122 ± 18 913	NR	NR	NR
Arsénico	0.0627 ± 0.003	41	75	1 ± 0.025
Cadmio	4.110 ± 0.382	39	85	3.2 ± 0.053
Cromo	6.240 ± 4.262	1 200	3 000	48 ± 0.251
Cobre	123.030 ± 42.659	1 500	1 200	236
Plomo	55.620 ± 26.289	300	840	18 ± 0.012
Mercurio	0.338 ± 0.017	17	57	2 ± 0.007
Níquel	16.610 ± 2.855	420	420	33 ± 0.194
Zinc	503.858 ± 356.179	2 800	7 500	321 ± 1.083

T.P. = Tratamiento Primario
NR = No Reportado

En cuanto a las características organolépticas de los biosólidos, se pudieron percibir las siguientes propiedades:

- Biosólido estabilizado con cal: no presentó mal olor, tiene un color de beige a blanco (dependiendo de la cantidad de cal adicionada, figura 5.1), se precipita fácilmente dejando un sobrenadante bastante claro (casi incoloro, figura 5.2), son fáciles de secar (sobre todo si se le va a dar un postratamiento de deshidratación), y de triturar. La estabilización alcalina con $Ca(OH)_2$ reduce sustancialmente la atracción de vectores.

Figura 5.1. Torta de biosólidos de $Ca(OH)_2$

Figura 5.2. Filtrado de biosólidos de $Ca(OH)_2$

- Biosólido estabilizado con sosa: presentó mal olor, tiene color café oscuro tanto la torta de lodos (figura 5.3) como el sobrenadante (figura 5.4), no se precipita con facilidad, muestran gran dificultad para secar y se recuperan muy pocos sólidos. Una vez secados son difíciles de triturar y no reducen sensiblemente la atracción de vectores.

Figura 5.3. Torta de biosólidos de NaOH

Figura 5.4. Filtrado de biosólidos de NaOH

5.3 Estabilización con hidróxido de calcio

5.3.1 Determinación de la dosis de $Ca(OH)_2$ (1ª Etapa)

Se determinaron las cantidades máximas de $Ca(OH)_2$ para alcanzar un pH de 12 en pruebas realizadas en 11 días distintos, y se obtuvieron las dosis baja, media y alta (en la figura 5.5 se pueden observar las dosis baja y alta representadas como 2 líneas verticales en los extremos de la línea horizontal y la dosis media (media muestral) es el punto en el centro de la misma) que corresponden a 0.226, 0.604 y 1.128 kg $Ca(OH)_2$/kg ST respectivamente. Estas dosis fueron las que se adicionaron a los lodos para su estabilización.

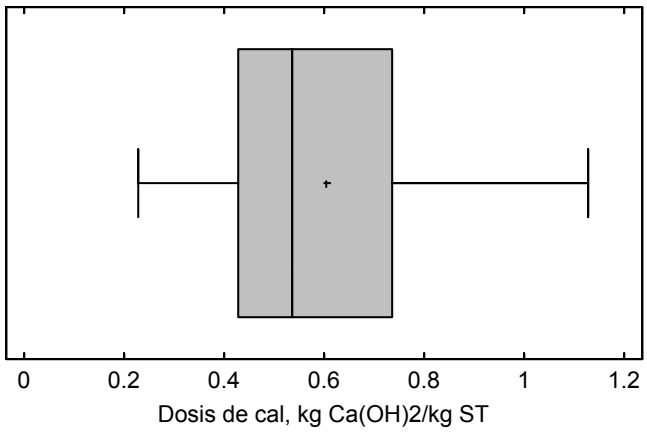

Figura 5.5. Dosis máximas de $Ca(OH)_2$

5.3.2 Determinación de la dosis de $Ca(OH)_2$ (2ª Etapa)

Se realizaron 4 pruebas de estabilización con hidróxido de calcio como reactivo químico alcalino con las tres dosis experimentales tomadas de la figura 5.5 de la primera etapa de estabilización. En estas pruebas se les determinó a cada una de las muestras de biosólidos el pH que alcanzaron y de acuerdo a los sólidos totales, la cantidad de $Ca(OH)_2$ que requirieron.

Posteriormente se obtuvieron las cantidades promedio de $Ca(OH)_2$ que se requirieron para estabilizar los lodos (tabla 5.4) para cada una de las dosis. En la figura 5.6 se puede observar que el volumen de sólidos producido en la estabilización con cal aumenta proporcional a la dosis adicionada.

Tabla 5.4. Dosis de $Ca(OH)_2$ aplicadas por prueba

D \ P	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Promedio
Dosis baja	0.321	0.365	0.304	0.384	0.344 ± 0.037
Dosis media	1.124	1.278	1.065	1.343	1.203 ± 0.130
Dosis alta	1.647	1.871	1.559	1.967	1.761 ± 0.190

D = Dosis, kg $Ca(OH)_2$/kg ST
P = Prueba

Figura 5.6. Dosis baja, media y alta de $Ca(OH)_2$ de izquierda a derecha.

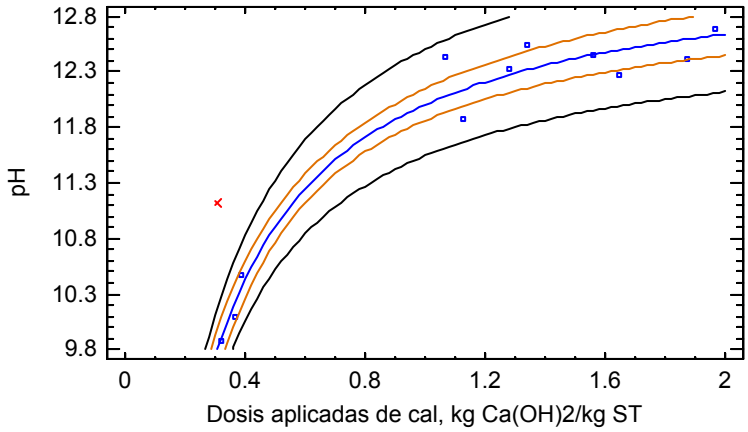

Figura 5.7. Diagrama de correlación "Dosis de $Ca(OH)_2$ vs pH"

Los resultados obtenidos de las 4 pruebas realizadas con las tres dosis de $Ca(OH)_2$ muestran un comportamiento muy similar para cada una de las cantidades que se adicionaron, obteniendo un incremento en el pH mientras más volumen de $Ca(OH)_2$ le fuera adicionado. Se alcanzaron valores de pH desde 9.88 para una dosis de 0.321 kg $Ca(OH)_2$/kg ST, hasta 12.68 para una dosis de 1.967 kg Ca(OH)/kg ST. La figura 5.7 relaciona los datos producidos en un modelo matemático llamado "doble inverso":

$$pH = \frac{1}{\left(0.0749226 + \frac{0.0083814}{Dosis\ apli\ cadas\ de\ c\ al}\right)}$$

La línea azul en el centro representa el ajuste del modelo, las líneas naranjas ubicadas en los extremos inferiores los límites de confianza y las líneas negras en los extremos superiores, la desviación estándar de los residuos o límites de predicción (donde se esperan que caigan los resultados, si se requieren de pruebas posteriores) con un valor de 0.00140106. El valor de R-cuadrada explicó una variabilidad del 97.5627% en el pH con el modelo ajustado.

El análisis de varianza (ANOVA) de la tabla 5.5, proporcionó información sobre el valor estadístico de P=0.0000 y si este es menor a 0.05, existe una relación estadísticamente significativa entre el pH y las dosis de cal adicionadas.

Tabla 5.5. Análisis de varianza "Dosis de $Ca(OH)_2$"

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	0.000707175	1	0.000707175	360.26	0.0000
Residuo	0.0000176668	9	0.00000196298		
Total	0.000724842	10			

Coeficiente de Correlación = 0.987738

R-cuadrada = 97.5627 %

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 97.2918 %

Error estándar del est. = 0.00140106

En la figura 5.8, se observa el promedio de las dosis aplicadas de $Ca(OH)_2$ respecto al pH alcanzado. En la dosis baja se obtuvieron unidades de pH desde 9.88 hasta 11.12, en la media desde 11.88 hasta 12.55 y en alta desde 12.27 hasta 12.68.

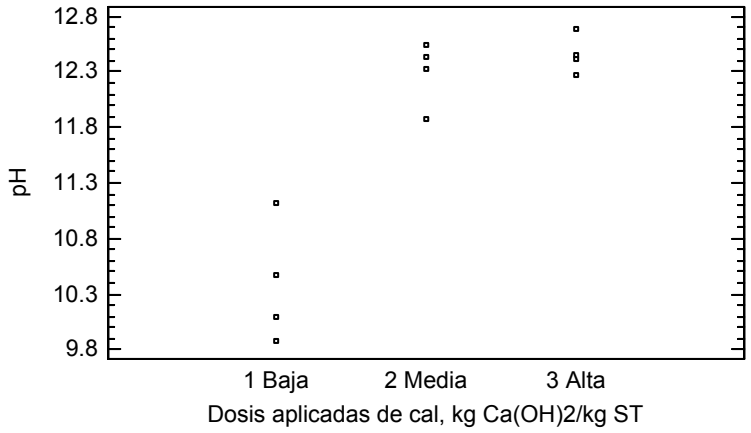

Figura 5.8. Diagrama de dispersión "Medias de las dosis de $Ca(OH)_2$"

El análisis de varianza (ANOVA) en la tabla 5.6 proporciona información sobre el valor estadístico de las medias, y confirma si las medias tienen diferencias estadísticamente significativas o no de acuerdo al valor P, de esta manera se pudo determinar la dosis apropiada de $Ca(OH)_2$, para alcanzar un pH de 12.

Tabla 5.6. Análisis de varianza de las dosis de $Ca(OH)_2$

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	10.5849	2	5.29247	38.66	0.0000
Intra grupos	1.23215	9	0.136906		
Total	11.8171	11			

Sin embargo, la ANOVA no especifica cuáles medias son diferentes, por lo cual se realiza el análisis de contrastes que se muestra en la tabla 5.7. En la cuarta columna de la tabla superior, se observan dos grupos homogéneos con una media de 12.2975 para la dosis media y de 12.4575 para la dosis alta y en la tabla inferior, dos diferencias significativas entre las dosis baja-media de -1.9075 y entre la media-alta de -2.075.

Tabla 5.7. Análisis de contrastes de las dosis de $Ca(OH)_2$, método de la diferencia mínima significativa (LSD, Fisher)

Dosis	Casos	Media	Grupos Homogéneos
1 Baja	4	10.39	X
2 Media	4	12.2975	X
3 Alta	4	12.4575	X

Contraste	Diferencia significativa	Diferencia	+/- Límites
1 Baja - 2 Media	*	-1.9075	0.59186
1 Baja - 3 Alta	*	-2.0675	0.59186
2 Media - 3 Alta		-0.16	0.59186

* indica una diferencia significativa.

Finalmente en el diagrama de caja y bigotes (figura 5.9) se muestran las tres dosis aplicadas de cal contra el pH al que llegaron, además de los cuartiles superior e inferior (cuadro gris) donde se encuentran concentrados el 50% de los datos ordenados de mayor a menor. Los valores máximos y mínimos de los valores de pH de cada una de las dosis están representados en las líneas horizontales de los extremos de la vertical. La media se presenta en la línea vertical dentro de la caja y la cruz representa la media muestral de cada una de las cantidades.

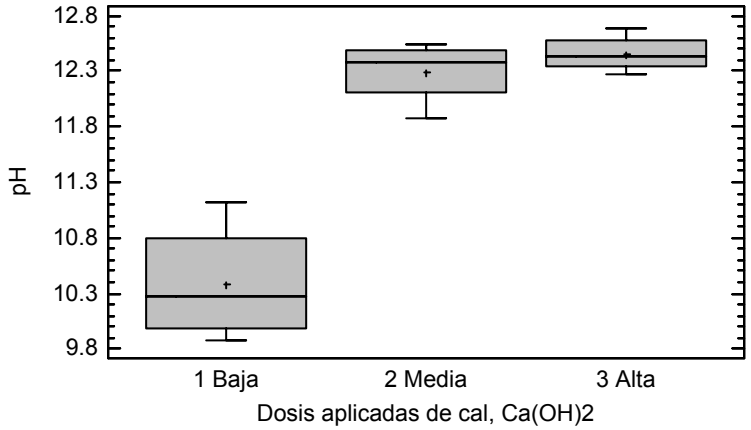

Figura 5.9. Diagrama de caja y bigotes de las dosis de $Ca(OH)_2$

5.3.3 Características de los biosólidos de $Ca(OH)_2$ después de 7 días

Después de cada estabilización, los biosólidos fueron filtrados y secados a temperatura ambiente, para después ser dispuestos en recipientes sellados. Transcurridos los 7 días después del proceso, se les midió el pH y se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla 5.8 para cada una de las dosis aplicadas:

Tabla 5.8. Dosis aplicadas de $Ca(OH)_2$

Dosis	Cantidad aplicada (kg $Ca(OH)_2$/kg ST)
Baja	0.344 ± 0.037
Media	1.203 ± 0.130
Alta	1.761 ± 0.190

En la figura 5.10 se observa el comportamiento del pH en cada una de las tres dosis de $Ca(OH)_2$ que fueron monitoreadas durante 7 días y almacenadas bajo las mismas condiciones de humedad y temperatura. Se observaron los valores más altos a las 2 horas de la estabilización donde la dosis baja tuvo un pH de 10.39 ± 0.54448, la media de 12.29 ± 0.2925 y la alta de 12.46 ± 0.16939 mientras que el pH más bajo se observó a los 7 días con valores de 9.0775 ± 0.5492 en la dosis baja, 11.1475 ± 1.05424 para la media y de 11.4175 ± 1.1555 en alta. En la parte superior de cada una de las barras se pueden distinguir las desviaciones estándar.

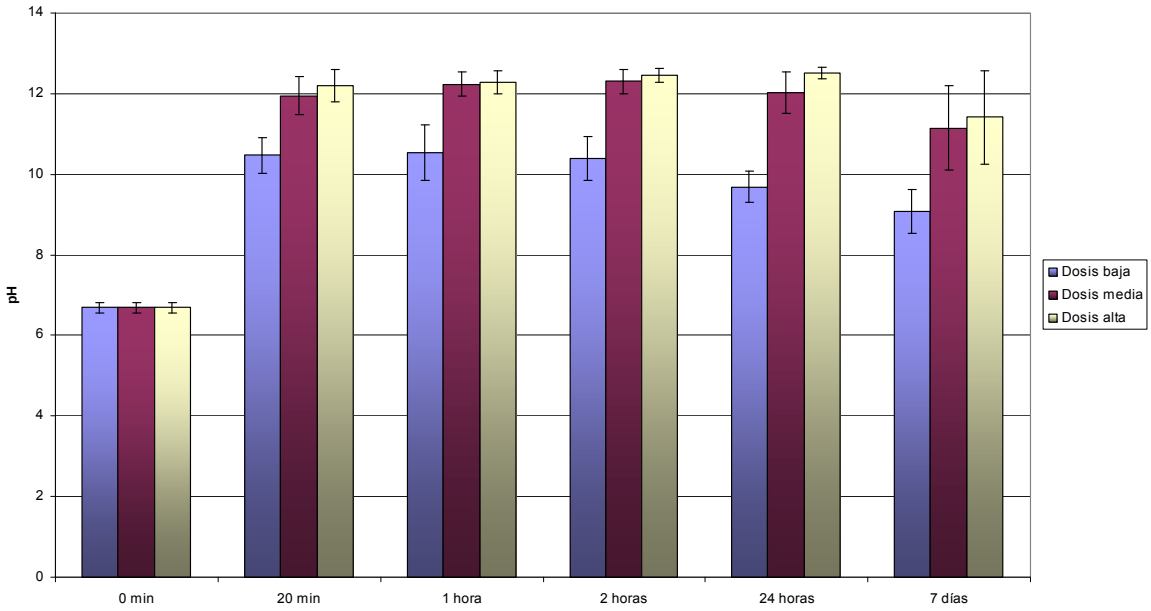

Figura 5.10. Diagrama comparativo de las tres dosis de $Ca(OH)_2$

5.4 Estabilización con hidróxido de sodio

5.4.1 Determinación de la dosis de NaOH (1ª Etapa)

A diferencia del comportamiento que presentó el $Ca(OH)_2$, los resultados de la determinación de las dosis experimentales de NaOH, para alcanzar un pH de 12 en 3 días de experimentación, resultaron ser muy semejantes, llegando a valores desde 0.529 hasta 0.639 kg NaOH/kg ST, por lo que se decidió utilizar la dosis media de 0.562 kg NaOH/kg ST (en la figura 5.11, se encuentra representada como la línea vertical dentro del cuadro gris) y tomando como referencia la relación entre la dosis media de $Ca(OH)_2$ con su dosis baja (3:1) y la dosis alta con la media (1:1.7), se determinaron las cantidades correspondientes para la realización de las pruebas con sosa, es decir, se utilizaron como dosis baja inicial 0.187 kg NaOH/kg ST y como alta inicial 0.96 kg NaOH/kg ST.

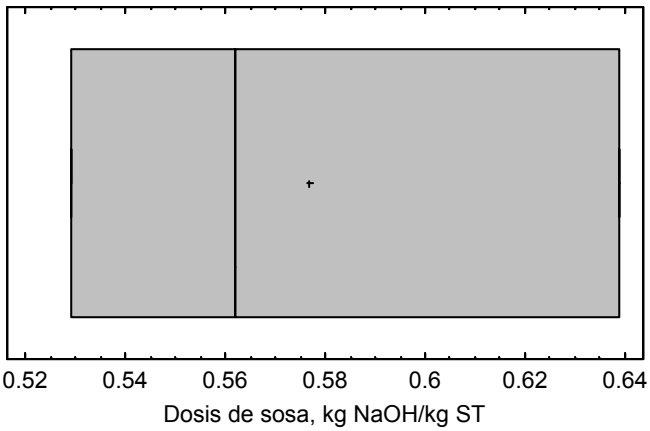

Figura 5.11. Dosis máximas de NaOH

5.4.2 Determinación de la dosis de NaOH (2ª Etapa)

De la misma manera que con el $Ca(OH)_2$, se realizaron 4 pruebas de estabilización con hidróxido de sodio (NaOH) como compuesto estabilizador, adicionando las 3 cantidades determinadas en la sección 5.4.1 y mencionadas como baja, media y alta. Los resultados obtenidos se observan en la tabla 5.9.

Contrario a lo ocurrido en la estabilización con $Ca(OH)_2$, el NaOH disminuye la cantidad de sólidos presentes en los biosólidos sin mostrar un comportamiento específico en relación a sus características organolépticas (como el color) y de volumen, es decir el cambio en el color y cantidad de los biosólidos, difiere de la dosis adicionada de NaOH (figura 5.12).

Tabla 5.9. Dosis de NaOH aplicadas por prueba

D P	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Promedio
Dosis baja	0.127	0.160	0.187	0.246	0.180 ±0.051
Dosis media	0.380	0.480	0.563	0.740	0.541 ± 0.152
Dosis alta	0.634	0.800	0.938	1.234	0.901 ± 0.254

D = Dosis, kg NaOH/kg ST
P = Prueba

Figura 5.12. Dosis baja, media y alta de NaOH de izquierda a derecha

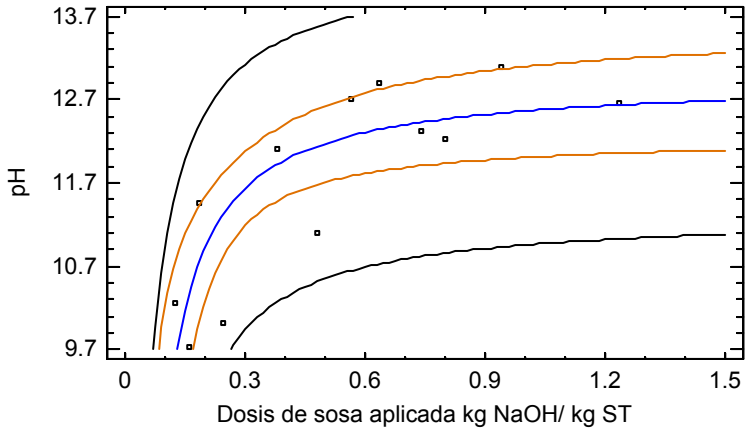

Figura 5.13. Diagrama de correlación "Dosis de NaOH vs pH"

En el diagrama de dispersión (figura 5.13) se presenta el comportamiento de los resultados obtenidos en las 4 experimentaciones, observando una tendencia al incremento en relación a las dosis aplicadas y el pH alcanzado. Los resultados a los que se llegaron van desde 9.74 unidades de pH para una dosis de 0.16 kg NaOH/kg ST hasta 13.09 unidades en 0.938 kg NaOH/kg ST.

Al correlacionar los datos, se obtiene el modelo Y-cuadrada X-inversa el cual describe su comportamiento como sigue:

$$pH = \sqrt{(164.493 + 30.8141 \times \ln(Cantidad\ \ aplicada\ d\ e\ Sosa))}$$

Y esta representado en la figura 5.13, como la línea azul que cruza por el centro de la dispersión. De igual manera se presentan los límites de confianza (líneas naranjas) y los límites de predicción (líneas negras), estos últimos con un valor de 14.7688. La variabilidad del pH se obtiene del valor de la R-cuadrada que corresponde al 72.7101 %.

En el análisis de varianza (ANOVA, tabla 5.10) se obtuvo P con un valor de 0.0004 el cual el menor a 0.05, por lo tanto se tiene una relación estadísticamente significativa entre las dosis de NaOH y el pH alcanzado.

Tabla 5.10. Análisis de varianza "Dosis de NaOH"

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	5811.46	1	5811.46	26.64	0.0004
Residuo	2181.18	10	218.118		
Total	7992.64	11			

Coeficiente de Correlación = 0.852702

R-cuadrada = 72.7101 %

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 69.9811 %

Error estándar del est. = 14.7688

El promedio de las dosis bajas, medias y altas de NaOH adicionadas en las pruebas de estabilización, se representan en la figura 5.15 respecto a los valores de pH, en donde abarcaron desde 9.74 hasta 11.45 unidades en la dosis baja, de 11.11 hasta 12.72 unidades en la dosis media y de 12.22 hasta 13.09 unidades en la dosis alta.

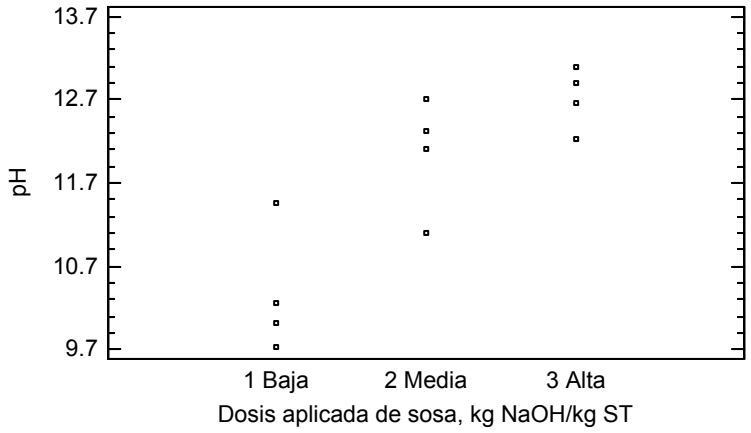

Figura 5.14. Diagrama de dispersión "Medias de las dosis de NaOH"

Tabla 5.11. Análisis de varianza de las dosis de NaOH

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	11.8	2	5.90001	15.05	0.0013
Intra grupos	3.52835	9	0.392039		
Total	15.3284	11			

Nuevamente en el análisis de varianza (tabla 5.11) se obtuvo del valor de P=0.0013, esta vez para determinar si existen diferencias estadísticamente significativas entre las medias de las dosis de NaOH, de tal manera que se lograra especificar la dosis requerida para la estabilización. Sin embargo, el análisis de varianza, no proporciona cual de las medias tienen esta característica, para lo cual se realizó la prueba de contrastes que se expone en la tabla 5.12. En la parte superior de la tabla, se pueden observar dos cruces que ocupan la misma columna, esto quiere decir que no existen diferencias significativas entre las medias 12.0675 y 12.72 de la dosis media y alta respectivamente, pero sí existen entre las dosis baja y media (diferencia de -1.7) y baja y alta (diferencia de -2.3525) como se muestra en la tabla 5.12 inferior.

Tabla 5.12. Análisis de contrastes para las dosis de NaOH, método de la diferencia mínima significativa (LSD, Fisher)

Dosis	Casos	Media	Grupos Homogéneos
1 Baja	4	10.3675	X
2 Media	4	12.0675	X
3 Alta	4	12.72	X

Contraste	Diferencia significativa	Diferencia	+/- Límites
1 Baja - 2 Media	*	-1.7	1.00155
1 Baja - 3 Alta	*	-2.3525	1.00155
2 Media - 3 Alta		-0.6525	1.00155

* indica una diferencia significativa.

El gráfico de caja y bigotes (figura 5.15), además de exponer las dosis de NaOH contra el pH, ilustra en el cuadro gris (cuarteles superior e inferior) el 50% de los resultados obtenidos en las pruebas, los valores máximo y mínimo de pH en los extremos de la línea vertical, la media y la media muestral, esta última representada por una cruz.

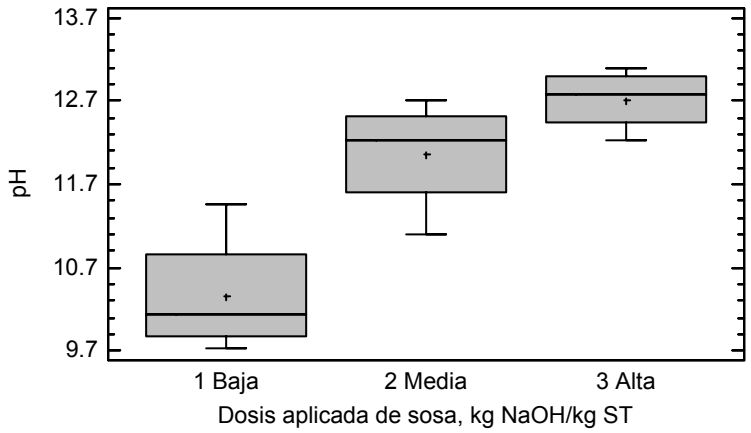

Figura 5.15. Diagrama de caja y bigotes de las dosis de NaOH

5.4.3 Características de los biosólidos de NaOH después de 7 días

De la misma manera que los biosólidos estabilizados con $Ca(OH)_2$, los biosólidos de NaOH se filtraron y secaron a temperatura ambiente y se almacenaron durante

7 días, momento en el cual se midió el pH, arrojando los datos que se ilustran en la tabla 5.13

Tabla 5.13. Dosis aplicadas de NaOH

Dosis	Cantidad aplicada, (kg NaOH/kg ST)
Baja	0.180 ± 0.051
Media	0.541 ± 0.152
Alta	0.901 ± 0.254

En la figura 5.16, las barras representan el pH al que llegaron las tres dosis experimentales con sus respectivas desviaciones así como, el incremento del pH inicial hasta valores máximos de 10.37 ± 0.75128224, 12.07 ± 0.6863 y 12.72 ± 0.3749 a las 2 horas de estabilización en las dosis baja, media y alta respectivamente. Los valores más bajos alcanzados se presentaron a los 7 días donde la dosis baja decreció a un pH de 9.18 ± 0.8015, la media a 10.58 ± 0.3567 y la alta hasta 10.92 ± 0.3346.

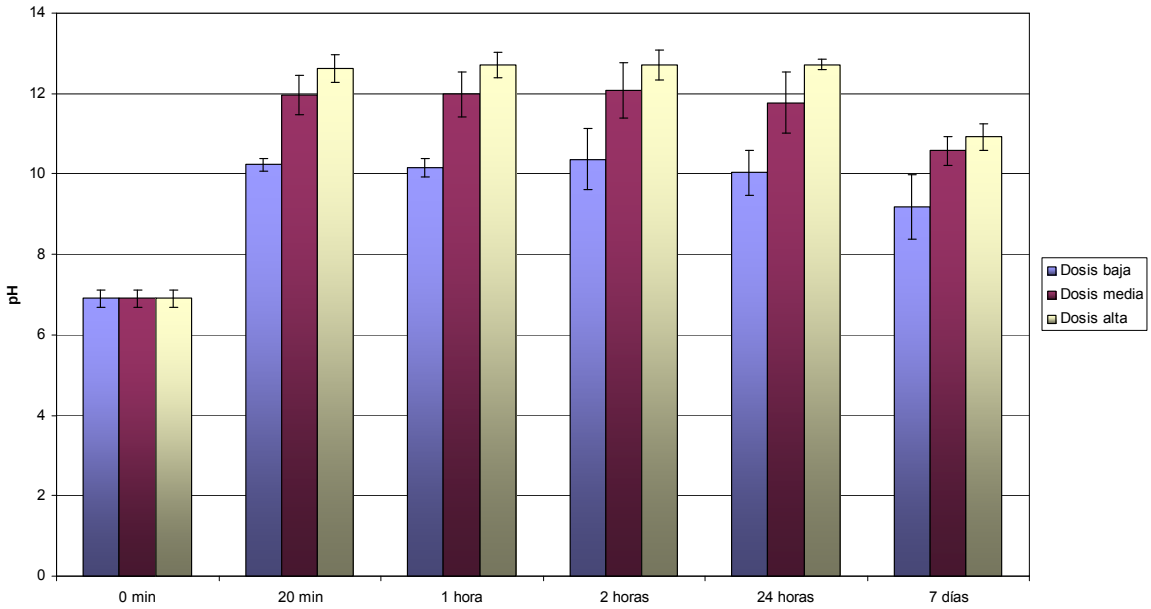

Figura 5.16. Diagrama comparativo de las tres dosis de sosa

5.5 Generación de lodos

Se cuantificó la generación de lodos en la planta de tratamiento cada día durante 5 días, y se obtuvieron volúmenes que fluctúan entre 141 y 185 L/día los cuales pueden observarse en la gráfica de cajas y bigotes sobre los extremos de la línea

horizontal. También se puede observar en la figura 5.17 que el valor de la mediana es de 170 L/día, la cual se indica en la línea vertical dentro del cuadro gris, la media equivalente a 164.2 L/día y los cuartiles superior e inferior con un valor de 145 y 180 L/día respectivamente y representados en el cuadro gris.

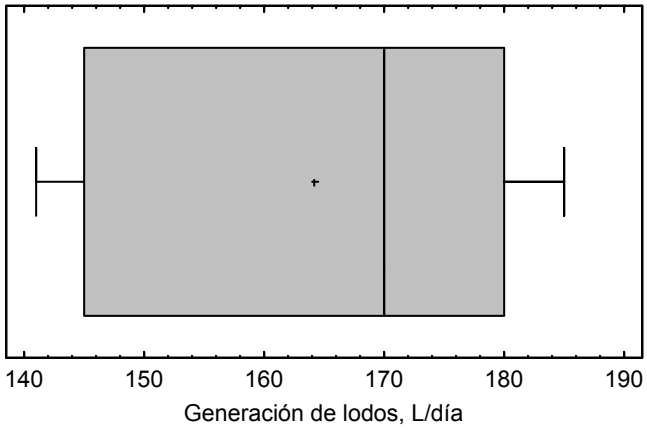

Figura 5.17. Caja y bigotes de generación de lodos

6 Análisis de resultados

En relación al contenido de microorganismos patógenos en los biosólidos respecto a los permitidos por la norma, el lodo estabilizado con $Ca(OH)_2$ y con NaOH de la planta piloto de tratamiento puede ser clasificado como de Clase A (tabla 3.5), lo que quiere decir que podría ser dispuesto para su uso urbano con contacto público directo, en cuanto al contenido de metales pesados en los biosólidos, ninguno sobrepasó la norma por lo que pueden clasificarse como excelentes. En la tabla 5.3 se puede observar que la concentración más alta se obtiene del Cu con un valor de 123.03 ± 42.66 mg/kg en base seca, esto puede ser debido a las tuberías y al uso del agua en los laboratorios de metalúrgica, mecánica y termofluidos, que son las áreas que trabajan con este material.

El aluminio no se encuentra normado y sin embargo las concentraciones de este metal fueron las más altas de todos los presentados, esto debido a que es el reactivo utilizado para la coagulación en el proceso de tratamiento del agua, el cual se precipita al reaccionar con la materia coloidal por lo que se encuentra presente en altas concentraciones en los lodos residuales.

6.1.1 Estabilización de lodos con $Ca(OH)_2$

La figura 5.7, muestra el comportamiento del pH respecto a las dosis de $Ca(OH)_2$ que fueron adicionadas en las cuales se observa claramente una tendencia al crecimiento de la alcalinidad mientras más producto se le adicionó, se puede percibir que los valores se concentran más en las mayores dosis que en la más baja, donde los valores de pH son muy similares. Esta información se puede corroborar en el análisis de varianza de la tabla 5.5, ya que el valor P es igual a 0.0000 (menor a 0.05) se confirmó que existe una relación estadísticamente significativa entre el pH y la dosis de $Ca(OH)_2$ con un nivel de confianza del 95%.

Finalmente, en el análisis estadístico para determinar la dosis de $Ca(OH)_2$ más apropiada para lograr la estabilización de los lodos, se puede observar en el diagrama de medias (figura 6.1), que existe una relación entre la dosis media y alta ya que sus medias se encuentran muy cercanas entre sí respecto a los valores de pH que alcanzaron. En el análisis de varianza (ANOVA, tabla 5.6), se observa que el valor de P de la prueba F es menor a 0.05 esto quiere decir que existen diferencias estadísticamente significativas entre algunas de las medias, por lo que al realizar el análisis de contrastes (tabla 5.7) se obtienen en los grupos homogéneos dos cruces en la misma columna que quiere decir que hay una relación entre la dosis media y alta. En la tabla 5.7 en la parte inferior, se muestran dos asteriscos en los pares de medias, lo cual significa que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las cantidades baja y media y media y alta, de tal manera que puede utilizarse ya sea 1.203 ± 0.130 ó 1.761 ± 0.190 kg de $Ca(OH)_2$/kg ST para alcanzar la estabilización.

Otros autores reportan dosis de 60 a 170 g $Ca(OH)_2$/kg ST (Tchobanoglous, 2002), y de 0.12 g $Ca(OH)_2$/g ST (WEF, 1995) para lodos producidos en un tratamiento primario. Estos valores se encuentran muy por debajo de las dosis requeridas para la estabilización del lodo probado.

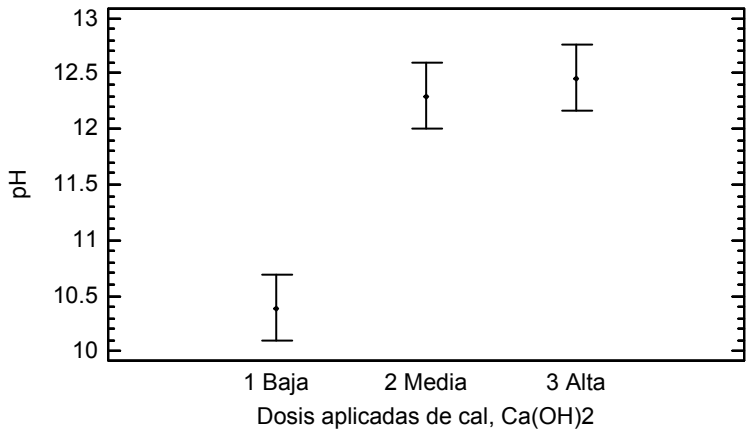

Figura 6.1. Diagrama de medias de las dosis de $Ca(OH)_2$

Sin embargo, en términos de costos, eficiencia, y volumen, es mas apropiado emplear la dosis media, ya que dispone de menos reactivo, cumple el objetivo y genera menos cantidad de lodos que la dosis más alta.

6.1.2 Características de los biosólidos de $Ca(OH)_2$ después de 7 días

En lo que concierne a las características de los biosólidos tratados con $Ca(OH)_2$, en el diagrama comparativo de las tres dosis (figura 5.10), se puede notar que la dosis baja, ni siquiera llegó al pH requerido para la estabilización a los 20 minutos, por lo que aunque se secaron (a las 2 horas) el lodo no se mantuvo en el pH requerido.

No obstante, tanto la dosis media como alta entran en los requerimientos de la norma, al alcanzar valores de pH de 12.298 ± 0.293 y 12.458 ± 0.169 a las 2 horas, y de 12.030 ± 0.512 y 12.503 ± 0.146 a las 24 horas de la adición de hidróxido de calcio respectivamente. El incremento en el pH de ambas dosis se mantienen prácticamente sin cambios.

6.1.3 Estabilización de lodos con NaOH

Como se aprecia en el diagrama de correlación (figura 5.13), los valores de las dosis de NaOH respecto al pH son muy dispersos y el modelo que se ajusta mejor, solo tiene una R-cuadrada de aproximadamente el 73%, pese a esto, el valor P de la razón F resultó de 0.004 que es menor a 0.05, por lo tanto hay una relación significativa entre las dosis de NaOH y el pH con un nivel del 95% de confianza.

En el análisis de varianza (ANOVA, tabla 5.10) se puede advertir que existen diferencias estadísticamente significativas entre las medias de las dosis ya que el valor P del factor F es igual a 0.0013 (menor a 0.05). Este análisis no precisa información sobre el grupo de medias que presentan estas características, sin embargo, en el diagrama de medias (figura 6.3) se puede observar gráficamente que las medias de las dosis media y alta se encuentran relativamente cerca una

de otra respecto a los valores alcanzados de pH, por lo que se puede constatar que también existen grupos homogéneos como se indica en la tabla 5.12 superior mientras que no hay diferencias significativas entre las dosis media y alta de NaOH (tabla 5.12 inferior), por lo que puede usarse tanto 0.541 ± 0.152 como 0.901 ± 0.254 kg de NaOH/kg ST para el tratamiento de estabilización.

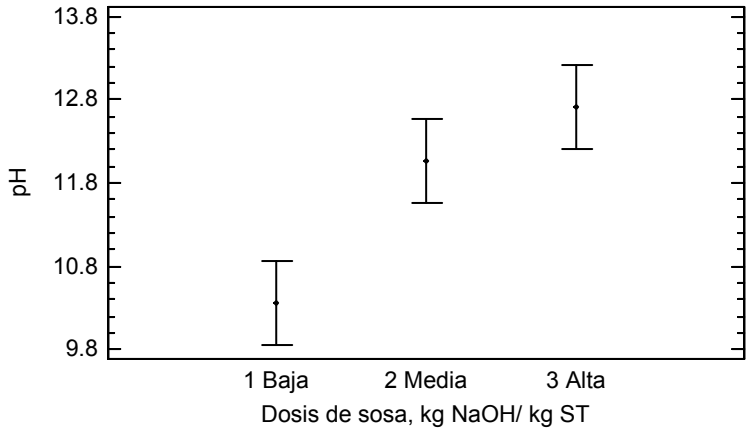

Figura 6.2. Diagrama de medias y 95% de Fisher LSD "Dosis de NaOH"

Tomando en cuenta estas consideraciones en cuanto a costos y eficiencia es más conveniente usar la dosis media, por la cantidad de reactivo a utilizar.

6.1.4 Características de los biosólidos de NaOH después de 7 días

En el diagrama comparativo (figura 5.16) se puede notar que las dosis media y alta se encuentran dentro de los límites permisibles de la norma, con valores de 12.068 ± 0.686 y 12.72 ± 0.124 en las 2 primeras horas y de 11.775 ± 0.767 y 12.72 ± 0.125 a las 24 horas de haberse adicionado hidróxido de sodio.

En cuanto a la dosis baja, no llegó al pH requerido para la estabilización ni siquiera a las primeras horas de la aplicación de sosa, por lo tanto 0.901 ± 0.254 kg NaOH/kg ST no son suficientes para tratar los lodos.

7 Conclusiones y recomendaciones

Los lodos de la planta de tratamiento de la UAM-Azcapotzalco, presentan una gran cantidad de materia orgánica y baja concentración de metales pesados por lo que tienen potencial de aplicación posterior, sin embargo, poseen un alto contenido de microorganismos patógenos lo que impide que se apliquen directamente y sea necesaria la estabilización.

Con el tratamiento de estabilización alcalina (con hidróxido de calcio o con hidróxido de sodio comerciales), se logró disminuir el contenido de microorganismos presentes en el lodo por debajo de los límites permitidos por la NOM-004-SEMARNAT-2002.

Los biosólidos resultantes quedaron clasificados de acuerdo a la norma como excelentes en relación a su contenido de metales pesados y de clase A en cuanto a la cantidad de patógenos y parásitos, por lo que pueden ser aprovechados para uso urbano con contacto público directo, usos forestales, mejoradores de suelo y usos agrícolas.

La cantidad de $Ca(OH)_2$ y de NaOH necesaria para elevar el pH del lodo a 12 unidades es proporcional a la cantidad de sólidos totales que contenga.

Se determinaron la dosis de $Ca(OH)_2$ y de NaOH apropiadas para la estabilización de los lodos, se requirieron 1.203 ± 0.130 kg de $Ca(OH)_2$/kg de ST y 0.541 ± 0.152 kg de NaOH/kg de ST respectivamente, sin embargo, fue más apropiado el uso de hidróxido de calcio comercial, ya que presentó mejores propiedades de filtrado y características organolépticas más aceptables que el hidróxido de sodio.

El tratamiento de los lodos con NaOH, no es una alternativa recomendable, ya que aparentemente reduce la cantidad de sólidos totales pero los hidroliza y los

disuelve en el agua, por lo que un volumen muy alto de estos queda en el filtrado y pocos en el filtro, además el tiempo que tarda en este proceso físico es casi 10 veces más que lo que tarda con el $Ca(OH)_2$. Aunque la cal presentó un comportamiento contrario al de la sosa en relación al incremento en la cantidad de sólidos totales, no es una desventaja debido a que la generación de lodos en la planta de tratamiento no constituye un problema grave, por lo que el incremento en el volumen es despreciable y para fines del postratamiento de deshidratación en donde se utiliza un filtro prensa, el uso de $Ca(OH)_2$ es una alternativa mucho más favorable.

Una vez que se obtuvo la dosis apropiada para tratar con $Ca(OH)_2$ o con NaOH los lodos de la planta de tratamiento, es recomendable aplicar un proceso de deshidratación del lodo ya que se cuenta con la instalaciones adecuadas.

Para complementar el tratamiento de estabilización de lodos, es recomendable darle un uso benéfico a los mismos ya sea como mejorador de suelos, como auxiliar en el proceso de composteo, para aplicación al campo, entre muchas otras aplicaciones.

8 Referencias bibliográficas

Ahn, K.-H.;Park, K.Y.;Maeng, S.K.;Hwang et al (2002). *Ozonation of wastewater sludge for reduction and recycling*. **Water Science and Technology**, 46 (10), 71-77.

Cárdenas J.I. (2002). *Manejo ambiental de biosólidos para uso agrícola*. Tesis de Maestría en Ciencias e Ingeniería Ambientales. UAM-A, México.

Cheremisinoff P.N. (1994). *Sludge Management and disposal.* New Jersey. Prentice-Hall.

Culp R.L., Wesner G.M., Culp G.L. (1977). *Handbook of advanced wastewater treatment.* New York. Van Nostrand Reinhold Environmental Engineering Series.

González A. (2007). *Evaluación del proceso combinado ácido peracético-luz ultravioleta para desinfección de agua residual tratada para utilizarse en riego de áreas verdes.* Tesis de Maestría en Ciencias e Ingeniería Ambientales. UAM-A, México.

EPA, Environmental Protection Agency (EPA) (1979). *Process Design Manual for Sludge Treatment and Disposal*. Cincinnati, Ohio.

EPA, Environmental Protection Agency (EPA) (1994). *Biosolids Recycling: Beneficial Technology for a Better Environment*. EPA832-R-94-009. Junio.

EPA, Environmental Protection Agency (EPA) (1996). Cd, Zn, Hg, Pb, Cu, As, Ni, Cr *(Atomic Absortion, Direct Aspiration).* Métodos: 7130, 7950, 7471, 7420, 7210, 7061, 7520, y 7190 respectivamente. Septiembre 1996.

EPA, Environmental Protection Agency (EPA) (1999). *Biosolids generation, use and disposal in the United States*. USA: Office of solid waste.

EPA (2003) *Environmental regulations and technology: control of pathogens and vector attraction in sewer sludge; EPA 625/R-92/013*; Office of Research and Development/National Risk Management Research Laboratory: Cincinnati, OH.

EPA, Environmental Protection Agency (EPA) (2004). S*olid and waste pH*. Mét 9045D. Revision 4, Noviembre 2004.

EPA, Environmental Protection Agency (EPA) (2007). *Microwave assisted acid digestion of sediments, sludges, soils, and oils.* Método 3051A. Revision 1, Febrero 2007.

Epstein E. (2003). *Land application of sewage sludge and biosolids*. Florida. Lewis.

Hsiau, P-C. (1997). *Effects of lime treatment on fractionation and extractabilities of heavy metals in sewage sludge*. **Journal of Environmental Science and Health***,* 32(9-10), 2521-2536.

Jiménez, B., Barrios, J.A., Maya, C. (2000). *Class B biosolids production from wastewater sludge with high pathogenic content generated in an advanced primary treatment***. Water Science and Technology**, 42(9), 103-110.

Jiménez, B.E. (2001). *La contaminación ambiental en México: causas, efectos y tecnología apropiada.* México D.F. Grupo Noriega.

LeBlanc, R. J., Allain, C.J., Downe, S., Pond, N., Laughton, P.J.(2006).*A unique, environmentally sustainable and cost-effective programme to re-vegetate military training lands utilizing composted wastewater biosolids at a large Canadian military training centre*. **Water Science and Technology***,* 54(9), 61-68.

MacConnell, G. S., Brookhart, M. V., Smith, P. E. (1992). *Alkaline sludge stabilization processes offer viable sludge management options*. **National Conference on environmental Engineering**, 396-398.

Metcalf & Eddy, (1991). *Wastewater Engineering.* 3ra edición. New York: McGraw Hill Publishing.

Murillo T. R. M., Barrios P. J. A., Jiménez C. B. (2007). *Aplicación de biosólidos como mejoradores de suelos salino-sódicos.* XIII Congreso Nacional de ingeniería sanitaria y ambiental. México, D.F. Femisca.

NMX-AA-034-SCFI-2201. *Análisis de agua: determinación de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba*. Diario Oficial. 13 de Diciembre de 1989.

NOM-004-SEMARNAT-2002. *Lodos y biosólidos: especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final*. Diario oficial. 15 de Agosto de 2003.

NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004. *Establece los criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio*. Diario oficial. 13 de Septiembre de 2004.

Perry R. H., Green D. W., Maloney J. O., (1996). *Perry Manual del ingeniero químico*. México, sexta edición. Mc Graw Hill.

Porta J., López M., Roquero C. (1999). *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. España: Grupo Mundi-Prensa.

Reyes, J.I. (1996). *Fundamentos teórico-prácticos de temas selectos de la ciencia del suelo. Parte I, Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa, libros de texto, manuales de prácticas y antologías.* México.

Roth, L.A. y Keenan, D. (1971) *Acid injury of Escherichia coli.* **Canadian Journal of Microbiology.** Vol. 17, No. 8. pp. 1005-1008.

Tchobanoglous, G. (2004). *Wastewater engineering: treatment and reuse.* New York: Mc Graw Hill.

Turovskiy, S. I. (2006). *Wastewater sludge processing.* New Jersey. John Wiley & sons, Inc.

Vesilind A.P. (1975). *Treatment and disposal of wastewater sludges.* Michigan. Ann Arbor Science Publishers, Inc.

Winnacker, K., Weingaertner, E. (1954). *Tecnología química. Tomo 1: Química industrial inorgánica*. Barcelona. GUSTAVO GILI, S. A.

W.P.C.F., Water Pollution Control Federation (1988). *Sludge conditioning manual of practice FD-14*. U.S.A.

WEF, Water Environment Federation (1995). *Wastewater residuals stabilization: manual of practice. FD-9.* USA.