

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA
“ANTONIO NARRO”
DIVISIÓN DE INGENIERÍA**



**CALIDAD DEL BIOSÓLIDO LÍQUIDO PRODUCTO DE LA
DIGESTIÓN ANAEROBIA**

Por:

LUIS ALBERTO MORGA CANCINO

Tesis

Presentada como Requisito Parcial
para Obtener el Título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.

Mayo de 2009

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA "ANTONIO NARRO"
DIVISIÓN DE INGENIERÍA

A Dios, por DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE

de mis estudios.

"Calidad del Biosólido Líquido Producto de la Digestión Anaerobia"
A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro que tanto me ha dado,
por cobijarme durante mi estancia. A mi "Alma Terra Mater", siempre te
llevaré en el corazón.

Presentado por:

Luis Alberto Morga Cancino

Con especial agradecimiento a la Dra. Manuela Bolívar Duarte por el
apoyo, confianza, consejos y ayuda en este trabajo de investigación.

Tesis.

Que Somete a Consideración del H. Jurado Examinador Como Requisito
Parcial para Obtener el Título de:

Al MC. Luis Rodríguez Gutiérrez por su disponibilidad, apoyo y
colaboración brindada para la realización de este trabajo de tesis.

INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

Aprobado:

A los maestros de **PRESIDENTE DEL JURADO**
enseñanzas y

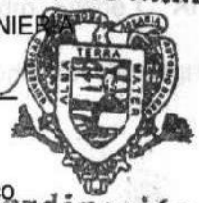
Manuela Bolívar Duarte
Dra. Manuela Bolívar Duarte

A las T.A. María del Socorro Minatas Vázquez y Silvia Guerrero Martínez
Vocal

Luis Rodríguez Gutiérrez
Vocal
M.C. Luis Rodríguez Gutiérrez

Dr. Uriel Figueroa Viramontes
Universidad Autónoma Agraria
"ANTONIO NARRO"

COORDINADOR DE LA DIVISIÓN DE INGENIERÍA
Raúl Rodríguez García
Dr. RAÚL RODRÍGUEZ GARCÍA



Buenvista, Saltillo, Coahuila, México
Mayo de 2009

Coordinación de
Ingeniería

AGRADECIMIENTOS

A **Dios**, por darme salud y su bendición, por estar conmigo en todo momento de mis estudios.

A la **Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro** que tanto me ha dado, por cobijarme durante mi estancia. A mi “Alma Terra Mater”, siempre te llevaré en el corazón.

Con especial agradecimiento a la **Dra. Manuela Bolívar Duarte** por el apoyo, confianza, consejos y ayuda en este trabajo de investigación.

Al **Dr. Uriel Figueroa Viramontes** por su valiosa colaboración en el presente trabajo de investigación.

Al **MC. Luis Rodríguez Gutiérrez** por su disponibilidad, apoyo y colaboración brindada para la realización de este trabajo de tesis.

A los maestros del **Departamento de Riego y Drenaje** por brindarme sus enseñanzas y experiencias para mi formación académica.

A las **T.A. María del Socorro Míreles Vásquez y Silvia Guerrero Martínez**. Por su valiosa colaboración en este trabajo de tesis.

A mis amigos de la carrera: Mayra, Judith, Azucena, José Luis, Said, Jhony, Milton, Felipe G, Erick, Humero, Gabriel, Lisandro, Felipe C, Ángel, Josué, por brindarme su amistad y haber compartido momentos de alegría.

DEDICATORIAS

A mis Padres. Aidé Cancino Álvarez y Eder Morga Vázquez, gracias por darme la vida, por haberme dado el estudio y apoyarme siempre. Le doy gracias a Dios por haberme dado a unos papas maravillosos, que quiero mucho, admiro y respeto, los llevo siempre en mi corazón.

A mis Hermanitos: Blanca Fanny, Nancy Dallany, Eder Antonio por estar siempre conmigo, por su amor, cariño y apoyo. Los admiro mucho y son la fuerza para que yo siga adelante.

A mis Abuelitos: Antonio, Laura, Ricarda y José María por darme su cariño, sus consejos y apoyo.

A mis tíos y primitos: gracias por su apoyo y consejos. En especial a **mi tío José Hugo.**

A mis amigos: Nayeli, Cinthia, Esperanza, Gabriela, Abigail, Javier (Picoro), Eber (Zopi), Eusebio, Máximo, Alarit, José, René, Víctor, Marcos, Sandino, Javier M, Dany, José Guadalupe, Alfredo (Chikis), Ever (Lobo).

ÍNDICE DE CONTENIDO

	Pág.
ÍNDICE DE CUADROS.....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
RESUMEN.....	xi
I. INTRODUCCIÓN.....	1
Objetivos.....	2
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
Digestión Aeróbica.....	3
Digestión Anaeróbica.....	4
Ventajas y Desventajas.....	4
Biodigestores.....	6
Tipos de Biodigestores.....	7
Biodigestor Tipo Hindú.....	9
Biodigestor Tipo Chino.....	10
Etapas de la Digestión Anaeróbica.....	11
Factores del Medio Ambiente.....	13
pH.....	14
Temperatura.....	14
Nutrientes.....	15
Toxicidad.....	16
Biosólidos.....	16

Principales Características de los Lodos o Biosólidos.....	18
Estabilización de los Biosólidos.....	20
Peligrosidad de los Lodos o Biosólidos.....	21
Biosólidos y la Legislación.....	22
Opciones de Uso y Desecho de Biosólidos.....	27
Métodos de Desecho de los Biosólidos.....	27
Métodos de Uso Benéfico de los Biosólidos.....	30
Aplicación de Biosólidos en la Agricultura.....	32
Calidad del Agua de Riego.....	33
Índices y Clasificación del Agua de Riego.....	34
Norma Riverside para Evaluar la Calidad del Agua de Riego	42
Fertilidad del Suelo.....	44
Propiedades Físicas del Suelo.....	44
Propiedades Químicas del Suelo.....	45
Dosis Agronómica Basada en el Nitrógeno.....	49
III. MATERIALES Y METODOS.....	51
Ubicación Geográfica	51
Instalación del Biodigestor.....	52
Metodología.....	54
Determinación de Parámetros del Líquido y Sólido.....	54
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	56
Salinidad y Sodicidad del Líquido.....	56
Riesgos de Salinización.....	57
Problemas de Sodicidad.....	58
Contenido de Elementos Tóxicos en las Plantas.....	59

Clasificación del Agua de Riego de Acuerdo a la Norma Riverside.....	59
Parámetros de la Calidad del Agua Residual.....	60
pH.....	60
Conductividad Eléctrica.....	61
Sólidos Totales.....	61
Sólidos Volátiles Totales.....	61
Sólidos Sedimentables.....	61
Demanda Química de Oxígeno.....	62
Sólidos Suspendidos Totales.....	62
Sólidos Totales Disueltos	62
Calidad y Fertilidad de los Sólidos.....	63
Características Físicas.....	63
Características Químicas.....	64
Relación Carbono/Nitrógeno C:N.....	66
Dosis Agronómica.....	67
V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	68
VI. LITERATURA CITADA.....	69

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 2.1	Ventajas y Desventajas de los Métodos de Tratamiento Anaeróbico y Aeróbico de Lodos.....	5
Cuadro 2.2	Límites Máximos Permisibles para Metales Pesados en Biosólidos.....	24
Cuadro 2.3	Límites Máximos Permisibles para Patógenos y Parásitos en Lodos y Biosólidos.....	25
Cuadro 2.4	Aprovechamiento de Biosólidos.....	26
Cuadro 2.5	Ventajas y Desventajas de la Incineración.....	28
Cuadro 2.6	Ventajas y Desventajas de Confinamiento en Rellenos Sanitarios.....	29
Cuadro 2.7	Índices de Clasificación Química Para el Agua de Riego.....	36
Cuadro 2.8	Clasificación del Agua de Riego de Acuerdo a la Conductividad Eléctrica	36
Cuadro 2.9	Clasificación del Agua de Riego Según la Salinidad Efectiva.....	37
Cuadro 2.10	Clasificación del Agua de Riego de Acuerdo a la Salinidad Potencial.....	38
Cuadro 2.11	Peligro de Sodicidad del Agua Basada en los Valores de RAS.....	39
Cuadro 2.12	Clasificación del Agua de Riego de Acuerdo al Carbonato de Sodio Residual.....	40

Cuadro 2.13 Clasificación del Agua de Riego de Acuerdo al Porcentaje de Sodio Residual.....	40
Cuadro 2.14 Clasificación del Agua de Riego de Acuerdo con el Contenido de Boro.....	41
Cuadro 2.15 Clasificación del Agua de Riego de Acuerdo con el Contenido de Cloruros.....	42
Cuadro 2.16 Clasificación de las Aguas Norma Riverside.....	43
Cuadro 2.17 Clasificación del Suelo Según el pH.....	45
Cuadro 2.18 Clasificación del Suelo de Acuerdo a la Conductividad Eléctrica.....	46
Cuadro 2.19 Clasificación del Suelo de Acuerdo al Nitrógeno Total.....	47
Cuadro 2.20 Clasificación del Suelo de Acuerdo al Fósforo.....	49
Cuadro 2.21 Clasificación del Suelo de Acuerdo al Potasio.....	49
Cuadro 3.1 Parámetros Determinados en Laboratorio.....	55
Cuadro 4.1 Resultado de Análisis Físicos y Químicos del Líquido.....	56
Cuadro 4.2 Resultados de los Índices de la Calidad Química del Líquido.....	57
Cuadro 4.3 Resultados del Análisis para Determinar Calidad del Líquido	60
Cuadro 4.4 Resultados del Análisis Físico Químico del Sólido.....	63

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1	Biodigestor Modelo Hindú	9
Figura 2.2	Biodigestor Modelo Chino.....	10
Figura 2.3	Etapas de la Metanogénesis en la Digestión Anaeróbica.....	13
Figura 2.4	Aplicación de Biosólidos Líquidos en Terrenos Agropecuarios y Forestales.....	31
Figura 2.5	Normas de Riverside para Evaluar la Calidad de las Aguas de Riego.....	42
Figura 3.1	Ubicación Geográfica del Área del Proyecto.....	51
Figura 3.2	Instalación del Biodigestor Anaerobio.....	53
Figura 3.3	Diagrama de Flujo del Biodigestor.....	53

RESUMEN

El presente trabajo fue desarrollado en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, se obtuvieron muestras de líquido y sólido del efluente de un biodigestor instalado a un constado de la granja porcina. Con el propósito de analizar parámetros de salinidad y sodicidad, calidad del agua residual y fertilidad.

Los análisis del líquido y sólido se realizaron en el Laboratorio de Calidad de Aguas del Departamento de Riego y Drenaje. Los parámetros de salinidad y sodicidad fueron: pH, C.E, Carbonatos, Bicarbonatos, sulfatos, Cloruros, Calcio, Magnesio, Sodio. Los Parámetros de calidad del agua residual: Sólidos Totales, Sólidos Totales Volátiles, Sólidos Suspendidos Totales, Sólidos Totales Disueltos , Sólidos Sedimentables, Demanda Química de Oxígeno. Los de fertilidad fueron los siguientes: pH, C.E, Nitrógeno total, Materia orgánica, Fosforo, Potasio, Carbonatos Totales y Textura.

En cuanto a la calidad del líquido y sólido, el pH se encuentra en un valor de 8.0 a 8.4 lo que puede afectar la actividad biológica, alta conductividad eléctrica. En lo que respecta a la calidad del agua residual los parámetros fueron elevados y en los análisis de fertilidad del sólido, el nitrógeno se encuentra en un valor bajo.

Dado que los valores obtenidos de dichos análisis fueron elevados es necesario realizar un mejor manejo del biodigestor y factores que pueden estar afectando el funcionamiento de éste.

Palabras clave: **biosólidos, biodigestor, salinidad, sodicidad y fertilidad.**

I. INTRODUCCIÓN

El uso benéfico de biosólidos se refiere principalmente a su aplicación en terrenos agrícolas, pastizales y forestales para suministrar nutrientes a las plantas que allí crecen y mejorar las condiciones del suelo. La aceptación de esta práctica ha ido en aumento porque es ecológicamente segura y viable. En términos económicos le ayuda al productor a ahorrar dinero con la reducción del uso de fertilizantes inorgánicos. El agua residual generada en la ciudad tiene altos contenidos de sólidos y semisólidos de origen orgánico e inorgánico suspendidos en ella, así como otros elementos que son añadidos durante su uso y aprovechamiento en las áreas domésticas, el comercio, los servicios y la industria. Por ello, el control y la regulación de las actividades que están sujetas a contaminar el agua demandan programas específicos para vigilar y monitorear las descargas de estas actividades.

México cuenta con normas y reglamentaciones de ley que permiten a la autoridad llevar a cabo esta vigilancia. La importancia de este control deriva también en la obtención de lodos residuales o “biosólidos” de alta calidad, cuyo contenido en elementos contaminantes no reduzcan su calidad y por lo tanto no puedan ser utilizados.

OBJETIVOS

- Obtener un biosólido líquido de calidad agronómica para ser utilizado como biofertilizante y mejorador del suelo.

- Promover el uso de biosólido líquido en prácticas agrícolas disminuyendo de esta manera el deterioro de los suelos y mantener un desarrollo sostenible para evitar la contaminación ambiental y el desequilibrio ecológico.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

En el pasado, la evacuación de las aguas residuales se llevaba a cabo sin considerar la acumulación de lodo y los malos olores que éstas causaban a los habitantes de los lugares donde se depositaban. Para resolver el problema se implementó el tratamiento de agua mediante diversos procesos. El biológico es uno de ellos y tiene como objetivo la estabilización de la materia orgánica (M.O), eliminación de sólidos no sedimentables y de patógenos a través de digestión aeróbica y anaeróbica.

Digestión Aeróbica

Es la estabilización del lodo por medio de microorganismos en presencia de oxígeno disuelto. Esta oxidación bioquímica puede llevarse a cabo en tanques abiertos o cerrados (**Torres y Zárate, 1996**). **Gamrasni (1985)** menciona que en ocasiones se mezclan lodos primarios con un exceso de lodos activados; esta mezcla tiende a la fermentación y para evitar malos olores se hacen pasar aire proveniente de una turbina, aire comprimido o con oxígeno puro. Durante este proceso se observa una mineralización de la M.O. teniendo como productos finales gas carbónico, agua y nitratos. Este procedimiento consume energía eléctrica y no permite la eliminación de algunos parásitos.

Digestión Anaeróbica

Es la degradación biológica de sustancias orgánicas complejas en ausencia de oxígeno libre. Durante el desarrollo de estas reacciones la M.O. se convierte en metano (CH_4), bióxido de carbono (CO_2), sulfuro de hidrogeno (H_2S), agua y liberación de energía (**Torres y Zárate, 1996**). A estos compuestos juntos, se les conoce, según **Gamrasni (1985)** como biogás o bioenergías, por ser un gas combustible.

Este procedimiento goza en la actualidad de gran importancia, a pesar de que es una de las formas de tratamiento biológico del agua residual más antigua (1850) y el más extendido como lo mencionan **Metcalf y Eddy (1997)**. El proceso termina con el desprendimiento del metano, producto altamente insoluble.

Ventajas y Desventajas

En el cuadro 2.1 se muestran las ventajas y desventajas de los métodos de tratamiento aeróbico y anaeróbico de lodos, según lo mencionan el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (**IMTA, 1993**) y **Torres y Zárate (1996)**. Además de las diferencias anteriores mencionan otra importante como es que una bacteria anaeróbica utiliza el 10 por ciento de la energía contenida en su alimento o sustrato para funciones de reproducción y el 90 por ciento restante, para la producción de gas metano. La bacteria aeróbica emplea, en presencia de oxígeno, de un 60 a 65 por ciento de la energía del sustrato en la síntesis de nuevas células y la fracción restante se disipara en forma de calor.

Cuadro 2.1. Ventajas y desventajas de los métodos de tratamiento anaeróbico y aeróbico de lodos. **IMTA (1993) y Torres y Zárate (1996).**

PROCESO	VENTAJAS	DESVENTAJAS
ANAERÓBICO	<ul style="list-style-type: none"> • Menor producción de lodo biológico. • Posibilidad de tratar desechos con alto contenido de materia orgánica. • Utilización del metano para la producción de energía. • Periodos prolongados sin alimentación. • El lodo biológico en el rango termofílico. 	<ul style="list-style-type: none"> • Lento crecimiento de bacterias metanogénicas. • Lentitud en el arranque. • Adaptación lenta de variaciones en la alimentación. • Dificultad en su control. • Productos reducidos en el efluente (requiere un postratamiento). • Complejidad en el sistema de distribución. • Dificultad en la construcción si son profundos. • El agua resultante contiene una alta cantidad de amonio. • Mayor tiempo de retención.
AERÓBICO	<ul style="list-style-type: none"> • Alta eficiencia en la remoción de materia orgánica. • Son procesos relativamente estables. 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere aireación. • Produce diez veces más lodo biológico. • Inadecuado para tratar residuos líquidos con altos contenidos de materia orgánica.

Biodigestores

Los aspectos relacionados con biodigestores son considerados por el sitio web, <http://www.proyectosfindecarrera.com>:

Un biodigestor es un recipiente cerrado o tanque el cual puede ser construido con diversos materiales como ladrillo y cemento, metal o plástico. El biodigestor, de forma cilíndrica o esférica posee un ducto de entrada a través del cual se suministra la materia orgánica (por ejemplo, estiércol animal producto del lavado de instalaciones) en forma conjunta con agua, y un ducto de salida en el cual el material ya digerido por acción bacteriana abandona el biodigestor.

Los materiales que ingresan y abandonan el biodigestor se denominan afluente y efluente, respectivamente. El proceso de digestión que ocurre en el interior del biodigestor libera la energía química contenida en la materia orgánica, la cual se convierte en biogás.

En general no son altamente eficientes desde el punto de vista de la biodegradación de los residuos y además necesitan elevados tiempo de retención para lograr un buen comportamiento del proceso. Los biodigestores más utilizados a nivel mundial son los de tipo hindú y los del tipo chino.

Los biodigestores operan bajo el siguiente principio hidrostático: La entrada de la carga diaria de residual al biodigestores por gravedad hasta el fondo del tanque, además de producir agitación, provocada la salida de un volumen equivalente de lodos digeridos.

Tipos de Biodigestores

Mandujano (1981) En forma general se clasifican, según su modo de operación, en los siguientes: de régimen estacionario o Batch, de régimen semicontinuo, horizontales de desplazamiento y de régimen continuo.

Los de régimen estacionario son muy utilizados para obtener fertilizante orgánico y consisten de tanques herméticos con una salida de gas. Se cargan una sola vez y se descargan cuando han dejado de generar gas.

Los de régimen semicontinuo se construyen enterrados, se cargan por gravedad una vez al día, en parte superior flota una campana donde se almacena gas.

Los horizontales de desplazamiento también se construyen enterrados semejantes a un canal, se operan a régimen semicontinuo, entrando la carga por un extremo del biodigestor y saliendo el efluente por el extremo opuesto.

Los de régimen continuo se utilizan principalmente para tratamiento de aguas negras; son plantas muy grandes que emplean equipos para proporcionar calefacción y agitación, éstos generalmente son de tipo industrial.

El Fondo para la Agricultura y la Alimentación (**FAO, 1995**) propone un prototipo denominado: “Biodigestor plástico de flujo continuo, generador de gas y bioabono a partir de aguas residuales servidas”, el cual es muy sencillo y económico. Las principales características de éste son: se hace con polietileno calibre 8 resistente a la luz ultravioleta (LUV), tiene capacidad para 9 m³ y el tiempo aproximado de retención para la digestión anaerobia de la materia orgánica diluida es de 30 a 40 días en zonas tropicales con temperaturas promedio de 30 °C.

Carballo (2007) Menciona que busca de una mayor eficiencia en la generación de biogás, se han desarrollado diversos tipos de digestores, entre ellos el filtro anaerobio, que proporciona grandes ventajas frente a los digestores convencionales (menor tiempo de retención), lográndose reducir en forma significativa el tamaño de la planta (con la consecuente disminución de costos de instalación y operación).

Actualmente se conocen dos diseños tradicionales de biodigestores de pequeña capacidad (hasta 50 m³) de producción de biogás, en dependencia de su origen: hindú y chino.

Biodigestor Tipo Hindú

El biodigestor tipo hindú consiste en un tanque reactor vertical que tiene instalado una campana flotante recolectora de biogás. De esta forma, la presión del gas sobre la superficie de la mezcla es muy baja, de alrededor de 300 mm de columna de agua. En este biodigestor se alcanzan productividades volumétricas (Pv) de 0.5 a 1m³ de biogás/volumen de reactor por día. (Fig.2.1)

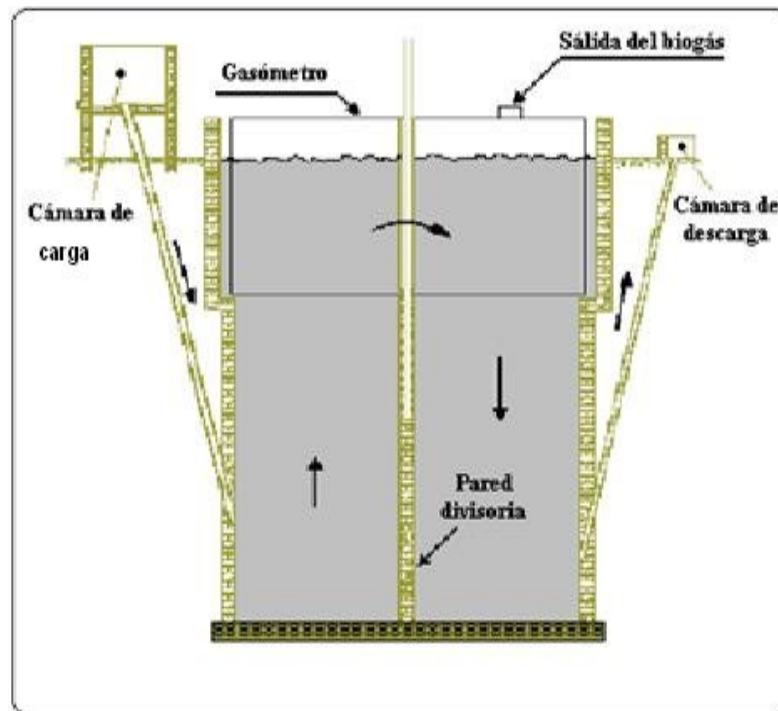


Figura 2.1 Biodigestor modelo hindú (Carballo, 2007)

Biodigestor Tipo Chino

El biodigestor tipo chino (Figura 2.2) no tiene campana flotante, sino techo fijo para la recolección del biogás. Son tanques redondos y achatados con el techo y el piso en forma de domo. En este caso, a medida que aumenta la producción de gas, aumenta la presión en el domo o cúpula fija, forzando al líquido en los tubos de entrada y salida a subir, llegándose a alcanzar presiones internas de hasta más de 10 mm de columna de agua.

La Pv en los biodigestores chinos está, generalmente, entre 0.15 y 0.2 m³. Los tiempos de retención de operación para los biodigestores tipo chino son de 30 a 60 días, requiriéndose para alcanzar la misma eficiencia (máximo 50 por ciento de reducción de la materia orgánica) de 1/2 a 1/3 de este tiempo de retención en los biodigestores tipo hindú.

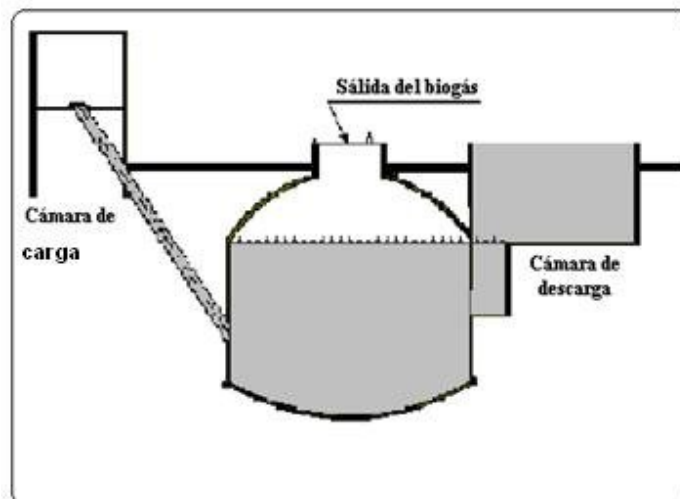


Figura 2.2 Biodigestor modelo chino (Carballo, 2007)

Etapas de la Digestión Anaerobia

Carballo (2007) menciona que mucho tiempo se consideró a la digestión anaerobia como un sistema bifásico, compuesto por la fase no metanogénica en que las bacterias anaerobias transformaban los substratos en productos solubles y gaseosos incluyendo acetatos, CO₂, H₂; y otra, la metanogénica donde las bacterias formadoras de metano (CH₄) utilizaban el acetato, mezclas de H₂ y CO₂ entre otros substratos para su metabolismo. Los términos con que se han identificado estas fases (acidificación y gasificación) no fueron del todo correctos; por cuanto, en la primera etapa no todos los productos que se forman son ácidos; así como no todos los productos gaseosos son derivados de la llamada etapa de gasificación.

Más tarde, se admitió que en la fermentación bacteriana intervienen poblaciones microbianas diversas, en la que se distinguen cuatro etapas: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis.

- **Hidrólisis o licuefacción:** En esta etapa los compuestos orgánicos son solubilizados por enzimas excretadas por bacterias hidrolíticas que actúan el exterior celular por lo que se consideran exoenzimas. La hidrólisis es por tanto, la conversión de polímeros en sus respectivos monómeros.
- **Acidogénesis:** En esta etapa los compuestos orgánicos solubles que comprenden los productos de la hidrólisis son convertidos en ácidos orgánicos tales como acético, propiónico y butírico, fundamentalmente.

- **Acetogénesis:** Se le conoce también como acidogénesis intermediaria en la cual los productos correspondientes son convertidos en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono. Durante esta etapa se produce ácido acético mediante la oxidación anaeróbica de ácidos grasos de cadena larga y de ácidos grasos volátiles (AGV's), productos de la fermentación que son convertidos en acetato, hidrogeno y dióxido de carbono por un grupo de bacterias conocidas como OHPA (bacterias acetogenas productoras obligadas de hidrogeno).
- **Metanogénesis:** En esta etapa metabólica el CH₄ es producido a partir del ácido acético o de mezclas de H₂ y CO₂, pudiendo formarse también a partir de otros sustratos tales como ácido fórmico y metanol.

La **Water Environmental Federation (WEF, 1996)**, supone la conversión bacteriana de los compuestos intermedios en productos finales más simples, principalmente metano y CO₂. (Fig. 2.3)

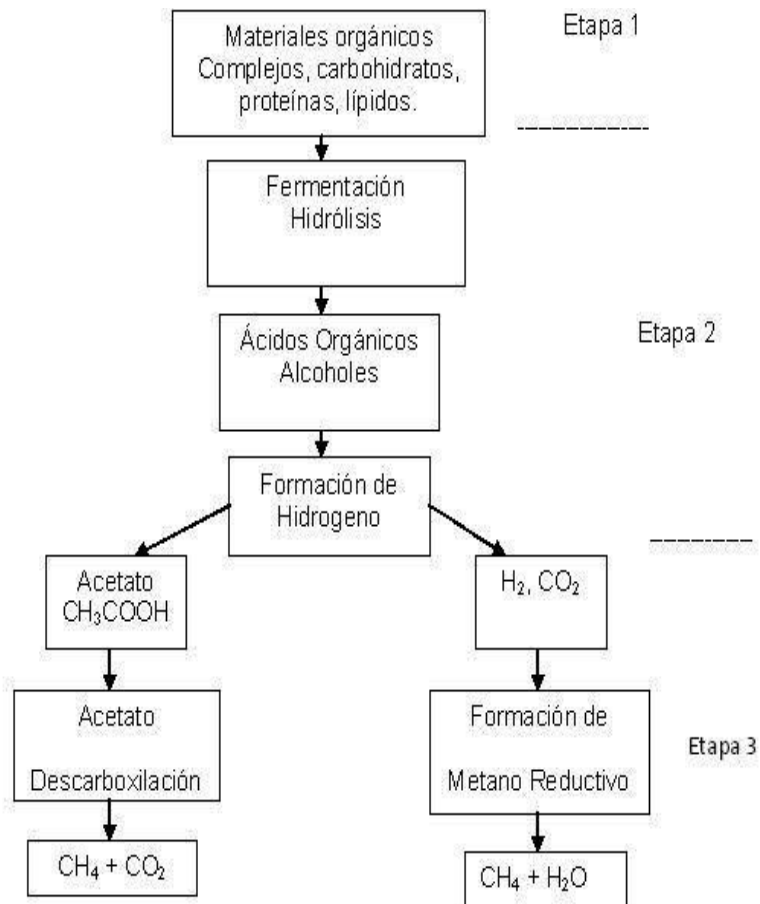


Figura 2.3 Etapas de la metanogénesis en la digestión anaeróbica (WEF, 1996)

Factores del Medio Ambiente

Los tratamientos biológicos de las aguas residuales contienen una mezcla de microorganismos que son capaces de metabolizar los residuos (Seoanez, 1995). En la mayoría de los casos los microorganismos involucrados en la digestión anaeróbica son muy sensibles al medio ambiente, por lo que requieren condiciones ambientales específicas para su reproducción y actividad

óptima. Lo anterior se verá reflejado en un incremento en la biomasa, así como en altos porcentajes de remoción de materia orgánica (**WEF, 1996**).

Según Carballo (2006) los parámetros importantes, son:

pH

El rango de pH óptimo es de 6.6 a 7.6. Los ácidos grasos volátiles (AGV's) y el acetato tienden a disminuir el pH del sustrato. Si las bacterias metanogénicas no alcanzan a convertir rápidamente los AGV's a medida que lo producen las bacterias acetogénicas, éstos se acumulan y disminuyen el pH en el biodigestor. Sin embargo, el equilibrio CO₂-bicarbonato opone resistencia al cambio de pH.

Existen dos métodos prácticos para corregir los bajos niveles de pH en el biodigestor. El primero es parar la alimentación del biodigestor y dejar que las bacterias metanogénicas asimilen los AGV's; de esta forma aumentará el pH hasta un nivel aceptable.

El segundo método consiste en adicionar sustancias buffer para aumentar el pH, como el agua con cal. Las cenizas de soda (carbonato de sodio) constituyen una variante más costosa, pero previenen la precipitación del carbonato de calcio.

Temperatura

Los niveles de reacción química y biológica normalmente aumentan con el incremento de la temperatura. Para los biodigestores de biogás esto es cierto

dentro de un rango de temperatura tolerable para diferentes microorganismos. Las altas temperaturas causan una declinación del metabolismo, debido a la degradación de las enzimas y esto es crítico para la vida de las células. Los microorganismos tienen un nivel óptimo de crecimiento y metabolismo dentro de un rango de temperatura bien definido, particularmente en los niveles superiores, los cuales dependen de la termoestabilidad de la síntesis de proteínas para cada tipo particular de microorganismo.

Las bacterias metanogénicas son más sensibles a los cambios de temperatura que otros organismos en el biodigestor. Esto se debe a que los demás grupos crecen más rápido, como las acetogénicas, las cuales pueden alcanzar un catabolismo sustancial, incluso a bajas temperaturas.

Existen tres rangos de temperatura para la digestión de residuales, el primero es el mesofílico (de 20 a 45 °C), el segundo es el termofílico (por encima de 45 °C), el óptimo puede ser de 35 °C a 55 °C. El tercer rango (psicrofílico) ocurre entre los 10 y 25 °C.

Nutrientes

Además de una fuente de carbono orgánico, los microorganismos requieren de nitrógeno, fósforo y otros factores de crecimiento que tienen efectos complejos. Los niveles de nutrientes deben de estar por encima de la concentración óptima para las metanobacterias, ya que ellas se inhiben severamente por falta de nutrientes. Sin embargo, la deficiencia de nutrientes

no debe ser un problema con los alimentos concentrados, pues estos aseguran en más que suficientes las cantidades de nutrientes.

Toxicidad

Los compuestos tóxicos incluso en bajas concentraciones, afectan la digestión y disminuyen los niveles de metabolismo. Las bacterias metanogénicas son generalmente las más sensibles, aunque todos los grupos pueden ser afectados.

Un nutriente esencial también puede ser tóxico si su concentración es muy alta. En el caso del nitrógeno, mantener un nivel óptimo para garantizar un buen funcionamiento sin efectos tóxicos es particularmente importante. Por ejemplo, en alimentos de alto contenido de proteína para el ganado, un desbalance por altos contenidos de nitrógeno y bajas disponibilidades energéticas, causa toxicidad por generación de amonio. Usualmente, el nivel de amonio libre, debe ser mantenido en 80 ppm. Sin embargo, una concentración más alta, alrededor de 1500-3000 ppm, puede ser tolerada.

Biosólidos

El término biosólido se origina dentro de la industria del tratamiento de aguas residuales, tratando de definir la porción descontaminada y agrícolamente viable de los lodos residuales generados por los sistemas de tratamiento de aguas residuales. Actualmente es utilizado para describir a los

lodos que contienen productos orgánicos con altos contenidos de nutrientes esenciales para las plantas que pueden ser benéficamente reciclados como fertilizantes y mejoradores del suelo **(Pissani, 1998)**.

Los biosólidos son materiales orgánicos ricos en nutrientes, derivados del tratamiento de las aguas residuales, que son estabilizados mediante un proceso biológico, físico o químico para cumplir con un estricto criterio de calidad y poder ser aplicados en suelos agrícolas. El término biosólidos proviene del método más común que se utiliza para su obtención, el cual consiste en el procesamiento biológico (digestión aeróbica o anaeróbica) de los sólidos procedentes del tratamiento de las aguas residuales. Una forma de reciclar benéficamente los biosólidos es su utilización en la agricultura, lo que permite reducir el uso de fertilizantes químicos comerciales, ofrecer la oportunidad de proveer N a bajo costo para los cultivos y también suministrar otros nutrientes al suelo. **(Fresquez, 1990)**.

Las plantas de tratamiento de agua residual procesan la materia orgánica contenida en las aguas negras, en un producto final de color café oscuro a negro llamado biosólidos. Este proceso involucra etapas en donde ciertos microorganismos descomponen y transforman los lodos residuales **(Koenig et al., 1998)**.

Principales Características de los Lodos o Biosólidos

Para que los lodos o biosólidos puedan ser reutilizados deben estar caracterizados físicoquímica y microbiológicamente con el fin de asegurar que no existan residuos peligrosos en su composición y de que no ocasionan efectos dañinos.

Las características de un lodo dependen de si es biológico o químico. También dependen de si es primario o secundario o mezcla de ambos. Las características del lodo se pueden describir mejor en términos físicos, químicos y biológicos (**Luna, 2002**).

Tester (1990) menciona que la aplicación superficial de biosólidos da como resultado un mejoramiento en las características físicas y químicas de los suelos, cuyo enriquecimiento nutrimental satisface parcialmente los requerimientos de fertilización.

La aplicación de biosólidos en suelos agrícolas se basa en satisfacer los requerimientos de N del cultivo para prevenir la sobre aplicación de metales pesados no esenciales, lo que ha mostrado ser una forma efectiva de reutilizar benéficamente los productos residuales (**Sullivan, 1998**).

Santiago (2000), menciona que la calidad del lodo depende, fundamentalmente de cuatro grupos principales:

Metales

Principalmente Zinc (Zn), Cobre (Cu), Níquel (Ni), Cadmio (Cd), Plomo (Pb), Mercurio (Hg) y Cromo (Cr). Su potencial de acumulación en los tejidos humanos y su bio-magnificación en la cadena alimentaria suscitan preocupaciones, tanto medioambientales como sanitarias.

Nutrientes importantes en las plantas

Nitrógeno y Fósforo. Su peligrosidad radica en su potencial de eutrofización para las aguas subterráneas y superficiales. Sin embargo, se pueden considerar como fertilizantes valiosos y el principal valor para la agricultura, de los lodos reside en su alto contenido de materia orgánica y por lo tanto de elementos esenciales para las plantas.

Contaminantes orgánicos

Plaguicidas, disolventes industriales, colorantes, plastificantes, agente tenso activo y muchas otras moléculas orgánicas complejas, generalmente con poca solubilidad en agua y elevada capacidad de absorción, tienden a acumularse en los lodos. Todos ellos son motivo de preocupación por sus efectos potenciales sobre el medio ambiente y, en particular, sobre la salud humana. Una característica específica de estos, es su potencial de biodegradación que puede ocurrir después de esparcir los lodos en la tierra o durante el composteo.

Agentes patógenos

Los agentes patógenos que se han encontrado en los lodos son las bacterias como la salmonella, los virus sobre todo enterovirus, los protozoos, los tremátodos, los céstodos y los nemátodos. Como resultado, para que cualquier vertido de los lodos sea seguro que precisa la eliminación, o al menos una inactivación suficiente, de estos agentes patógenos.

Estabilización de los Biosólidos

Figuroa (2002). El propósito de la estabilización de los lodos es reducir en etapas subsecuentes el proceso de biodegradación de los compuestos orgánicos, la estabilización puede ser efectuada por procedimientos de tipo biológico o bien químico. La mayoría de los procesos de estabilización causan al mismo tiempo una desactivación de los organismos patógenos y virus. Esta condición de lodos estabilizados también reduce la atracción de vectores, como son las moscas, roedores y todos aquellos animales que pueden ser atraídos por los lodos no estabilizados y que son capaces de transmitir enfermedades infecciosas.

En el proceso de estabilización biológica, la materia orgánica contenida es reducida por una degradación biológica, en un proceso controlado. Comúnmente los lodos de las aguas residuales doméstico-municipal son estabilizados biológicamente en forma líquida, en digestores anaerobios en el que la producción de gas metano se da como producto resultante y un menor

volumen de lodos se genera al final del proceso. Los lodos líquidos pueden también ser estabilizados biológicamente en digestores aeróbicos, en los cuales se requiere la adición de oxígeno.

La estabilización química de los lodos, es efectuada no como un proceso para reducir la cantidad de materia orgánica biodegradable, sino para crear condiciones que inhiban la acción de microorganismos, y de esta manera retardar la degradación de la materia orgánica y prevenir la generación de olores. La manera más común de estabilización química es la de elevar el pH de los lodos, utilizando cal o material alcalino.

Los lodos pueden ser químicamente estabilizados en forma líquida o desaguados, la reacción exotérmica de la cal con el agua presente, causa un calentamiento que ayuda a destruir los organismos patógenos y a evaporar el agua.

Peligrosidad de los Lodos o Biosólidos

Para **Vigueros y Ortiz (2000)** los lodos de desecho de plantas de tratamiento de agua son potencialmente peligrosos y requieren el análisis CRETIB (Corrosivo, reactivo, explosivo, tóxico, inflamable y biológico-infeccioso). Si la prueba CRETIB es negativa en los lodos se tienen dos posibilidades de disposición final.

1. Rellenos sanitarios
2. Aplicación en suelos forestales y agrícolas siempre y cuando cumplan con los límites máximos permisibles.

Si el contenido de metales pesados excede los límites marcados para un lodo “bueno”, o la cantidad de patógenos o parásitos señalados para un lodo clase B, entonces no es aplicable como biosólido y tiene que disponerse en un relleno sanitario autorizado.

Las rutas principales que pueden seguir las sustancias peligrosas contenidas en los lodos de desecho son por el suelo o por lixiviación hasta alcanzar un cuerpo de agua. Los mecanismos importantes son:

- Solubilidad
- Lixiviación
- Adsorción/deserción
- Volatilización
- Bioacumulación
- Contacto directo

Biosólidos y la Legislación

En lo referente a la legislación, en el país actualmente se cuenta con la NOM-004-SEMARNAT-2002. Protección ambiental.- Lodos y biosólidos, la cual establece las especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes en los lodos o biosólidos, provenientes del desazolve de los sistemas de

alcantarillado urbano o municipal, de las plantas potabilizadoras y de las plantas de tratamiento de aguas residuales, con el fin de posibilitar su aprovechamiento o disposición final y proteger al medio ambiente y la salud humana.

La norma en mención es la única que existe y es de observancia obligatoria para todas aquellas personas físicas y morales que generan lodos y biosólidos, generados como se expreso anteriormente.

Los biosólidos son definidos en la NOM-004-SEMARNAT-2002 en su apartado 3.7 como: los lodos provenientes de las plantas de tratamiento de aguas residuales, que por su contenido de nutrientes y por sus propias características o por las adquiridas después de un proceso de estabilización, pueden ser susceptibles de aprovecharse.

Por otra parte, el conocimiento de la calidad de los biosólidos es aspecto decisivo para su manejo, disposición o utilización. El proceso para dictaminar el destino de un lodo o biosólidos inicia con lo establecido por la NOM-052-ECOL-1993, la cual señala un análisis CRETIB (Corrosivo, reactivo, explosivo, toxico, inflamable y biológico-infeccioso) **(Flores, 2003)**.

Una vez cumplido este requisito son sometidos a los requerimientos contemplados en la NOM-004-SEMARNAT-2002, para una vez cubiertos ser utilizados en libremente en la agricultura.

Para efectos de la NOM-004-SEMARNAT-2002 los biosólidos se clasifican en tipo: excelente y bueno en función de su contenido de metales

pesados (Cuadro 2.2); y en clase A, B y C en función de su contenido de patógenos y parásitos (Cuadro 2.3)

Cuadro 2.2 Límites máximos permisibles para metales pesados en biosólidos (NOM-004-SEMARNAT-2002).

CONTAMINANTE (determinados en forma total)	EXCELENTES Mg/kg en base seca	BUENOS Mg/kg en base seca
Arsénico	41	75
Cadmio	39	85
Cromo	1200	3000
Cobre	1500	4300
Plomo	300	840
Mercurio	17	57
Níquel	420	420
Zinc	2800	7500

Cuadro 2.3 Límites máximos permisibles para patógenos y parásitos en lodos y biosólidos (**NOM-004-SEMARNAT-2002**).

CLASE	INDICADOR BACTERIOLÓGICO DE CONTAMINACIÓN	PATÓGENOS	PARÁSITOS
		Coliformes fecales NMP/g en base seca	Salmonella spp. NMP/g en base seca
A	Menor de 1 000	Menor de 3	Menor de 1
B	Menor de 1 000	Menor de 3	Menor de 10
C	Menor de 2 000 000	Menor de 300	Menor de 35

El aprovechamiento de los biosólidos, se establece en función del tipo y clase, como se especifica en el cuadro 2.4 y su contenido de humedad hasta el 85 por ciento.

Cuadro 2.4 Aprovechamiento de biosólidos (**NOM-004-SEMARNAT-2002**).

TIPO	CLASE	APROVECHAMIENTO
EXCELENTE	A	<ul style="list-style-type: none"> • Usos urbanos con contacto público directo durante su aplicación • Los establecidos para la clase B y C
EXCELENTE O BUENO	B	<ul style="list-style-type: none"> • Usos urbanos sin contacto directo durante su aplicación • Los establecidos para la clase C
EXCELENTE O BUENO	C	<ul style="list-style-type: none"> • Usos forestales • Mejoramiento de suelos • Usos agrícolas

La aplicación de los biosólidos en terrenos con fines agrícolas y mejoramiento de suelos se sujetara a lo establecido en la Ley Federal de Sanidad Vegetal y conforme a la normatividad vigente en la materia.

Los sitios para la disposición final de lodos y biosólidos, serán los que autorice la autoridad competente, conforme a la normatividad vigente en la materia. Los lodos y biosólidos que cumplan con lo establecido en la NOM-004-SEMARNAT-2002, pueden ser almacenados hasta por un periodo de dos años. El predio en el que se almacenen deben ser habilitados para que no existan infiltraciones al subsuelo y contar con sistema de recolección de lixiviados.

Se permite la mezcla de dos o más lotes de lodos o biosólidos, siempre y cuando ninguno de ellos este clasificado como residuo peligroso y su mezcla resultante cumpla con lo establecido en dicha Norma (**NOM-004-SEMARNAT-2002**).

Opciones de Uso y Desecho de Biosólidos

Figuroa (2002) menciona que biosólidos generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales deben ser removidos continuamente de ellas para evitar grandes acumulaciones que entorpezcan las operaciones de las plantas. Así, los biosólidos removidos pueden ser desechados o utilizados benéficamente, sin embargo, cualquiera que sea la elección debe ser económica y ecológicamente viable.

Métodos de Desecho de los Biosólidos

Incineración

La incineración de biosólidos consiste en la práctica de quemarlos en un horno cerrado a altas temperaturas reduciéndolos a cenizas. Los sistemas de incineración constan del incinerador más equipos de control de contaminación del aire que atrapan pequeñas partículas y los metales adheridos en ellas y en los gases emitidos durante la combustión de los biosólidos. La incineración presenta ventajas y desventajas (Cuadro 2.5).

Cuadro 2.5 Ventajas y Desventajas de la Incineración (Figuroa 2002).

Incineración	
Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • La ceniza resultante de la quema tiene un volumen considerablemente menor que los biosólidos lo que facilita su desecho final, especialmente en donde no hay áreas disponibles para confinar o utilizar los biosólidos. • Es una forma de desechar los biosólidos que no reúnen la calidad para su uso en actividades agropecuarias. • Si la ceniza no se clasifica como peligrosa se puede utilizar en productos de construcción como ladrillos o desecharla en rellenos sanitarios. 	<ul style="list-style-type: none"> • Puede producir contaminación del aire por los gases y cenizas que se libaran durante la combustión. • Hay presencia de malos olores si la combustión no es la adecuada. • Los costos de operación son altos. • Los incineradores requieren mantenimiento frecuente.

Confinamiento en Rellenos Sanitarios

Otro método de desechos de los biosólidos es su confinamiento en áreas dedicadas para este fin. Las ventajas y desventajas del desechar los biosólidos en áreas de confinamiento se muestran en el cuadro 2.6 (Figuroa, 2002).

Cuadro 2.6 Ventajas y desventajas de Confinamiento en Rellenos Sanitarios (Figuroa 2002).

Confinamiento en Rellenos Sanitarios	
Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none">• Se puede mezclar con otro tipo de desechos sólidos, por ejemplo, basura.• Se pueden utilizar como la última capa de los rellenos sanitarios, lo que promovería el establecimiento de vegetación sobre estas áreas.• Se puede desechar biosólidos que no cumplen con los requerimientos para la aplicación en terrenos agropecuarios y forestales.	<ul style="list-style-type: none">• Puede ocurrir contaminación de mantos acuíferos por lixiviación de metales pesados y nitratos contenidos en los biosólidos.• Difícil de maniobrar especialmente con biosólidos con alto contenido de humedad.• Requiere de mucha maquinaria.• La maquinaria requiere de limpieza diaria.• Mucha mano de obra.• Altos costos de operación.

Métodos de Uso Benéfico de los Biosólidos

Figuroa (2002) también menciona los métodos de uso benéfico de biosólidos estos son:

Incorporación en Suelos

El uso benéfico de los biosólidos se refiere a tomar ventaja de su contenido de nutrientes y materia orgánica y aprovecharlos como fertilizante orgánico y mejorador de suelo o elaborar composta. Los biosólidos en lugar de ser un desecho se consideran como un valioso recurso para la producción agropecuaria y forestal.

Aplicación de Biosólidos en Terrenos Agropecuarios y Forestales

Este método de utilización de biosólidos se refiere a la aplicación de biosólidos en terrenos agrícolas, de pastizal y forestales con el objetivo de acondicionar el suelo y/o fertilizar los cultivos o la vegetación que crece en ellos (Figura 2.4). La aplicación de los biosólidos en terrenos agrícolas puede ser:

1. Esparciéndolos o asperjándolos sobre la superficie e incorporarlos con un rastreo dentro de las 24 horas siguientes o dejándolos sobre la superficie cuando la incorporación no es posible como en terrenos de pastizal o forestales.
2. Inyectándolos directamente bajo la superficie del suelo sin necesidad de otra labor de labranza. Los biosólidos líquidos se aplican con equipo especializado en tanto los desecados se esparcen con equipo similar a una “estercoladora” convencional.

Actualmente el uso benéfico de biosólidos esta incrementándose en tanto el desecho está disminuyendo. La aceptación del uso benéfico es debido a que representa un ahorro de dinero para los agricultores y menor costo para los gobiernos, es ecológicamente seguro porque sólo se aplica la tasa agronómica requerida por el equipo, lo que minimiza el riesgo de contaminación de las fuentes de agua y los biosólidos utilizados cumplen con la ley respecto al contenido de metales pesados, patógenos y poder de atracción de vectores diseminadores de patógenos por lo que no representan peligro para la población y el medio ambiente.



Figura 2.4. Aplicación de biosólidos líquidos en terrenos agropecuarios y Forestales (Figuroa, 2002).

Aplicación de Biosólidos en la Agricultura

El uso de residuos en la agricultura data desde la antigüedad, el Imperio Romano, utilizaba desechos humanos en la agricultura, los antiguos chinos, usaban *night soil* en la agricultura, en los Estados Unidos, en 1880 existían reportes de 103 de 222 ciudades, los cuales usaban los desechos humanos en la agricultura (**Barrios, 2004**).

Fondahl (1999) menciona que California un Estado con 31 millones de habitantes utiliza en tierras agrícolas, el 52 por ciento de los biosólidos producidos (390,000 toneladas por año en base seca), mientras que Arizona utiliza el 86 por ciento de lo que produce, lo cual corresponde a 56, 000 toneladas por año.

Smith (1996) menciona que con frecuencia, la aplicación de biosólidos a tierras de cultivo es, posiblemente, el método de eliminación más barato. Se puede comparar con lo que se hace tradicionalmente con el estiércol o los residuos de ganadería. Ofrece una oportunidad para reciclar nutrientes de las plantas y materia orgánica beneficiosos para las cosechas. Además, parece que, en muchos casos, la aplicación de los lodos al suelo puede mejorar las propiedades físicas de este, aumentando la productividad de las cosechas.

Sin embargo, **Bontoux (1999)**, mencionan cuidar los contaminantes químicos o patógenos presentes en los lodos, para que no produzcan efectos adversos. Por ejemplo, las concentraciones de metales pesados en los lodos suelen ser mayores que las que existen en el suelo y estos elementos pueden

quedar retenidos indefinidamente en las capas de suelo. Por tanto, las aplicaciones repetidas de lodos aumentarían gradualmente el contenido en elementos traza del suelo.

Según la aplicación de los lodos y las concentraciones de los metales, se puede calcular el tiempo (generalmente de 70 a 80 años) en que se alcanzarían las concentraciones máximas permisibles de cada elemento en el suelo. Pasado este periodo los lodos no se pueden aplicar más, de forma segura. Zn, Cu y Hg son los principales elementos que limitan el resultado de lodos en las tierras de cultivo, mientras que el Cd suscita problemas específicos debidos a su toxicidad y a su movilidad variable.

Calidad del Agua de Riego

La calidad del agua de riego es un término que se utiliza para indicar la conveniencia o limitación del empleo del agua, con fines de riego de cultivos agrícolas, para cuya determinación generalmente se toman como base las características químicas del agua; así como la tolerancia de los cultivos a las sales, las propiedades de los suelos, las condiciones de manejo de suelos y aguas y las condiciones climatológicas (**Palacios y Aceves 1970**).

Pizarro (1978) menciona que cuando se estudia la calidad de agua para riego, no basta conocer su contenido en sales; es necesario analizar la naturaleza de éstas, ya que todas las soluciones salinas producen los mismos efectos, estos dependen de su proporción de sodio, solubilidad de las sales, contenido en Boro, etc. además de la composición química, hay que tener en cuenta los siguientes factores; cultivos que se van a regar, suelo y clima.

Índices y Clasificación del Agua de Riego

Según **Palacios y Aceves (1970)** la clasificación del agua de riego se lleva a cabo con el fin de dar panorama acerca de la calidad del agua y con esto poder dar alternativas de uso de dichas aguas. Inicialmente, con base solamente en las características químicas del agua, el técnico concluye si es buena o no recomendable para el riego, o bien si se requiere de información adicional sobre los cultivos, suelo y condiciones de manejo donde va a ser utilizada, en cuyo caso, la calidad del agua quedara condicionada.

Aguas de Buena Calidad

Estas aguas pueden ser utilizadas para el riego de la gran mayoría de los cultivos, en la generalidad de los suelos, con el mínimo de cuidados en el manejo de suelos y aguas.

Aguas No Recomendables

Este tipo de aguas no se recomienda para ser empleadas directamente y de manera permanente en el riego de la mayoría de los suelos y cultivos bajo las prácticas usuales de manejo; a menos que sean mezcladas con otras de mejor calidad, de manera que los índices de la mezcla no rebasen los valores señalados; sólo en casos muy esenciales podrá permitirse el empleo de esta agua; aplicación esporádica para cultivos muy tolerantes, con aplicación de fuertes láminas de sobre- riego, con buenas condiciones de drenaje, aplicación de mejoradores, tanto al agua como al suelo, etc.

Aguas Condicionadas

Cuando los valores de los índices estén comprendidos entre los extremos señalados, la calidad del agua no puede ser definida en base exclusivamente a sus características químicas, si no que se requiere de información adicional sobre los cultivos y suelos en los que se va a emplear, así como sobre las condiciones de manejo del suelo y agua y condiciones climatológicas. Estas condiciones pueden referirse a una práctica específica o a las condiciones dominantes de una zona de riego. Definidas estas condiciones de acuerdo con la tolerancia del cultivo, la permeabilidad y condiciones de drenaje del suelo, etc. Podrá decirse si el agua es buena o no recomendable para riego en esas condiciones.

Los índices de clasificación química para el agua de riego se indican en el cuadro 2.7.

Cuadro 2.7 Índices de clasificación química para el agua de riego (**Palacios y Aceves 1970**)

INDICES	ABREVIATURAS
Conductividad Eléctrica	CE
Salinidad Efectiva	SE
Salinidad Potencial	SP
Relación de Absorción de Sodio	RAS
Carbonato de Sodio Residual	CSR
Por ciento de Sodio Posible	PSP
Contenido de Boro	B
Contenido de Cloruros	Cl

Conductividad Eléctrica (CE)

Conductividad eléctrica es una medida de la propiedad que poseen las soluciones acuosas para conducir la corriente eléctrica. Esta propiedad depende de la presencia de iones, su concentración, movilidad y valencia, y de la temperatura de medición. La clasificación de agua de riego de acuerdo a la Conductividad eléctrica se da en el cuadro 2.8.

Cuadro 2.8 Clasificación del agua de riego de acuerdo a la Conductividad Eléctrica (**Palacios y Aceves 1970**)

Clasificación	CE a 25° C (μS/cm)	Concentración aproximada de sal en gr/l
Agua de baja salinidad	0 a 250	Menor de 0.2
Agua de salinidad media	250 a 750	0.2 a 0.5
Agua altamente salina	750 a 2250	0.5 a 1.5
Agua muy altamente salina	2250 a 5000	1.5 a 3.0

Salinidad Efectiva (SE)

Es una estimación mas real del peligro que presentan las sales solubles del agua de riego al pasar a formar parte de la solución del suelo. Este proceso es más notable cuando las aguas tienen un alto contenido de carbonatos y bicarbonatos. Este índice se calcula: Si $Ca^{++} + Mg^{++} < CO_3^{=} + HCO_3^{-}$ entonces $SE = \text{suma de cationes}^* - (Ca + Mg)$. *Suma de cationes o aniones, la que sea mayor. La clasificación del acuerdo a la salinidad efectiva se menciona en el cuadro 2.9.

Cuadro 2.9 Clasificación del agua de riego según la Salinidad Efectiva (Palacios y Aceves 1970)

Clase	Salinidad Efectiva en Meq/l
Buena	Menos de 3
Condicionada	De 3 a 15
No recomendable	Más de 15

Salinidad Potencial (SP)

Cuando la humedad aprovechable del suelo disminuye a niveles inferiores del 50 por ciento, las últimas sales que quedan en solución son los cloruros y parte de los sulfatos.

La Salinidad Potencial es un índice para estimar el peligro de estas últimas sales que quedan en solución a bajos niveles de humedad y que por consiguiente aumentan considerablemente la presión osmótica. Este índice se

calcula: $SP = Cl + \frac{1}{2} SO_4$. Clasificación del agua de riego de acuerdo a la Salinidad Potencial se presenta en el cuadro 2.10.

Cuadro 2.10 Clasificación del agua de riego de acuerdo a la Salinidad Potencial
(Palacios y Aceves 1970)

Clase	Salinidad Potencial en Meq/l
Buena	Menos de 3
Condicionada	De 3 a 15
No recomendable	Más de 15

Relación de Absorción de Sodio (RAS)

La sodicidad del agua es la cantidad relativa de sodio. Las aguas de riego con un alto contenido de sodio tienden a producir suelos con niveles altos de sodio intercambiable. El sodio influye en la estabilidad de la estructura del suelo. Para caracterizar el nivel relativo de sodio en las aguas de riego, así como en las soluciones del suelo, se usa la Relación de Absorción de Sodio (RAS). La Relación de Absorción de Sodio se puede calcular con: $Na^+ / [(Ca^{++} + Mg^{++})/2]^{1/2}$. La Peligrosidad de sodicidad del agua basada en los valores de RAS se presenta en el cuadro 2.11.

Cuadro 2.11 Peligro de sodicidad del agua basada en los valores de RAS
(Palacios y Aceves 1970)

Valores de RAS	Peligro de Sodicidad del agua	Comentarios
1-10	Bajo	Tener precauciones en su uso en cultivos sensibles al sodio.
10-18	Medio	Mejoradores (como el yeso) y lavar el suelo son necesarios.
18-26	Alto	Generalmente no recomendable para uso continuo.
26	Muy Alto	Generalmente no recomendable para uso.

Carbonato de Sodio Residual (CSR)

Cuando en el agua de riego el contenido de carbonatos y bicarbonatos es mayor que el calcio y magnesio, existe la posibilidad de que se forme carbonato de sodio, debido a que, por su alta solubilidad, puede permanecer en solución aun después de que han precipitado los carbonatos de calcio y magnesio. En estas condiciones, la concentración total y relativa del sodio puede ser suficiente desplazar al calcio y magnesio del complejo de intercambio, produciendo la defloculación del suelo. El carbonato de Sodio Residual se calcula con: $CSR = (CO_3^{2-} + HCO_3^-) - (Ca^{++} + Mg^{++})$. La clasificación de agua de riego de acuerdo al Carbonato de Sodio Residual se presenta en el cuadro 2.12.

Cuadro 2.12. Clasificación del agua de riego de acuerdo al Carbonato de Sodio Residual (**Palacios y Aceves 1970**)

Clase	Valor de CSR en Meq/l
Buena	Menos de 1.25
Condicionada	De 1.25 a 2.50
No recomendable	Más de 2.50

Porciento de Sodio Posible (PSP)

El peligro de desplazamiento del calcio y magnesio por el sodio, en el complejo de intercambio empieza cuando el contenido de sodio en solución presenta más de la mitad de los cationes disueltos. El porciento de sodio en solución en el agua de riego no es suficientemente representativo de este peligro, debido a que las sales menos solubles (CaCO_3 , MgCO_3 y CaSO_4) precipitan y por tanto, el porcentaje de sodio en solución aumenta relativamente. Por la razón anterior. El Porciento de Sodio Residual (PSP) está referido a la salinidad efectiva: $\text{PSP} = \text{Na}^+ / \text{SE} * 100$. En el cuadro 2.13 se indica la clasificación del agua de riego de acuerdo al Porciento de Sodio Posible.

Cuadro 2.13 Clasificación del agua de riego de acuerdo al Porciento de Sodio Residual (**Palacios y Aceves 1970**)

Clase	PSP (%)
Buena	Menor a 50
Condicionada	Mayor a 50
No recomendable	No se define

Contenido de Boro (B)

El Boro es un microelemento indispensable para el buen desarrollo de las plantas, sin embargo a muy bajas concentraciones apenas superiores a las indispensables empieza a ser tóxico para la mayoría de los cultivos. La clasificación del agua de riego se indica en el cuadro 2.14.

Cuadro 2.14 Clasificación del agua de riego de acuerdo con el contenido de Boro (**Palacios y Aceves 1970**)

Clase	Valor de B en Meq/l
Buena	Menos de 0.50
Condicionada	De 0.50 a 4.00
No recomendable	Más de 4.00

Contenido de Cloruros (Cl)

El ión Cloruro es especialmente tóxico en árboles frutales, sin reporte de estudios en los cultivos (**Palacios y Aceves 1970**). La clasificación del agua de riego de acuerdo con el contenido de Cloruros se presenta el cuadro 2.15.

Pizarro (1978) indica que la mayoría de las clasificaciones no consideran por separado el ión cloro, debido a que no es un ión absorbible ya que su efecto se estudia incluido en la C.E.

Cuadro 2.15 Clasificación del agua de riego de acuerdo con el contenido de Cloruros (**Palacios y Aceves 1970**)

Clase	Valor de Cl en Meq/l
Buena	Menos de 1.00
Condicionada	De 1.00 a 5.00
No recomendable	Más de 5.00

Norma Riverside para evaluar la calidad del agua de riego

Establece la clase de agua en función del riesgo de salinización mediante la Conductividad Eléctrica y la alcalinización con la Relación de Absorción de Sodio (RAS) que puede originar su uso (Figura 2.5).

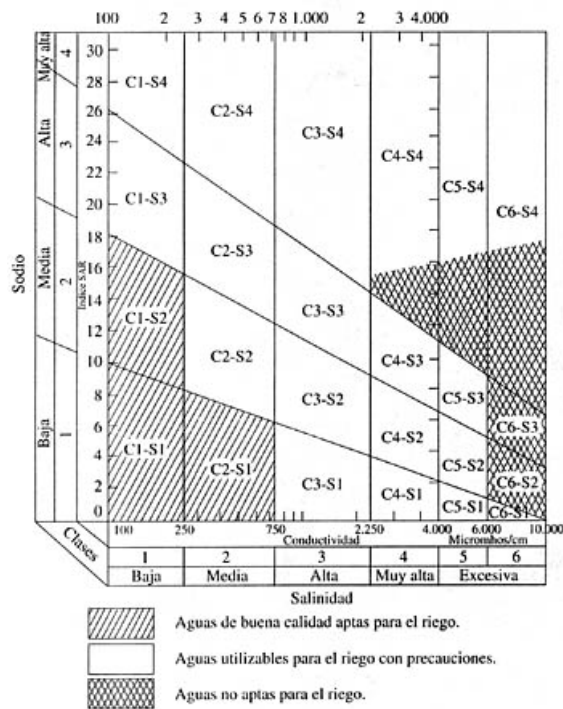


Figura 2.5 Normas de Riverside para evaluar la calidad de las aguas de riego (**U. S Soil Salinity Laboratory, 1973**).

Clasificaciones de las aguas según las normas Riverside (cuadro 2.16)

Cuadro 2.16 Clasificación de las aguas norma Riverside (**U. S Soil Salinity Laboratory, 1973**).

Tipos	Calidad y normas de uso
C₁	Agua de baja salinidad, apta para el riego en todos los casos. Pueden existir problemas sólo en suelos de muy baja permeabilidad.
C₂	Agua de salinidad media, apta para el riego. En ciertos casos puede ser necesario emplear volúmenes de agua en exceso y utilizar cultivos tolerantes a la salinidad.
C₃	Agua de salinidad alta que puede utilizarse para el riego de suelos con buen drenaje, empleando volúmenes de agua en exceso para lavar el suelo y utilizando cultivos muy tolerantes a la salinidad.
C₄	Agua de salinidad muy alta que en muchos casos no es apta para el riego. Sólo debe usarse en suelos muy permeables y con buen drenaje, empleando volúmenes en exceso para lavar las sales del suelo y utilizando cultivos muy tolerantes a la salinidad.
C₅	Agua de salinidad excesiva, que sólo debe emplearse en casos muy contados, extremando todas las precauciones apuntadas anteriormente.
C₆	Agua de salinidad excesiva, no aconsejable para riego.
S₁	Agua con bajo contenido en sodio, apta para el riego en la mayoría de los casos. Sin embargo, pueden presentarse problemas con cultivos muy sensibles al sodio.
S₂	Agua con contenido medio en sodio, y por lo tanto, con cierto peligro de acumulación de sodio en el suelo, especialmente en suelos de textura fina (arcillosos y franco-arcillosos) y de baja permeabilidad. Deben vigilarse las condiciones físicas del suelo y especialmente el nivel de sodio cambiante del suelo, corrigiendo en caso necesario.
S₃	Agua con alto contenido en sodio y gran peligro de acumulación de sodio en el suelo. Son aconsejables aportaciones de materia orgánica y empleo de yeso para corregir el posible exceso de sodio en el suelo. También se requiere un buen drenaje y el empleo de volúmenes de agua de riego.
S₄	Agua con contenido muy alto de sodio. No es aconsejable para el riego en general, excepto en caso de baja salinidad y tomando todas las precauciones apuntadas.

Fertilidad del suelo

Según **Sánchez (2007)** la fertilidad del suelo es una cualidad resultante de la interacción entre las características físicas, químicas y biológicas del mismo y que consiste en la capacidad de poder suministrar condiciones necesarias para el crecimiento y desarrollo de las plantas.

Propiedades físicas del suelo

Textura

La textura del suelo se define como la proporción en porcentaje de partículas de diferentes diámetros: para las arenas de 2.00 a 0.05 mm; para limo de 0.05 a 0.002 mm y para las arcillas de menos de 0.002 mm. La textura nos proporciona una idea general de las propiedades físicas del suelo.

La textura es una propiedad física primaria y guarda relación con otras, como por ejemplo:

- La permeabilidad
- La capacidad retentiva del agua
- La porosidad
- La aireación
- Las densidades real y aparente
- Capacidad de intercambio catiónico
- La estructura

Propiedades químicas del suelo

Bolívar (2006) menciona las propiedades químicas importantes del suelo, a continuación se mencionan:

pH

Es una propiedad que tiene influencia indirecta en los procesos químicos, disponibilidad de nutrientes, procesos biológicos y actividad microbiana. Es definido como el logaritmo inverso de la actividad de iones hidrógeno en la solución suelo.

A la mayoría de especies cultivadas, les favorece pH entre valores de 5.5 a 7.5, pero cada especie y variedad tiene un rango específico donde se desarrolla mejor, normalmente entre pH 6.5 y 7.0. La clasificación del suelo de acuerdo a su pH se presenta en cuadro 2.17.

Cuadro 2.17 Clasificación del suelo según el pH (**Bolívar, 2006**)

Clasificación	pH
Extremadamente ácido	0 - 4.50
Muy fuertemente ácido	4.60 - 5.19
Fuertemente ácido	5.20 - 5.59
Medianamente ácido	5.60 - 6.19
Ligeramente ácido	6.20 - 6.79
Neutro	6.80 - 7.19
Muy ligeramente alcalino	7.20 - 7.39
Ligeramente alcalino	7.40 - 7.79
Medianamente alcalino	7.80 - 8.39
Fuertemente alcalino	8.40 - 8.79
Muy fuertemente alcalino	8.80 - 9.39
Extremadamente alcalino	9.40

Conductividad Eléctrica (CE)

La conductividad eléctrica es la concentración aproximada de sales solubles en los extractos de suelo y agua. Es la inversa de la resistencia expresada en ohmios.

Todos los suelos contienen por lo menos pequeñas cantidades de sales solubles. Las acumulaciones de sales solubles en cantidades mayores se deben principalmente a la influencia de las filtraciones, drenajes y aguas de irrigación seguidas de evaporación. La clasificación del suelo de acuerdo a la Conductividad Eléctrica se presenta en cuadro 2.18.

Cuadro 2.18 Clasificación del suelo de acuerdo a la conductividad eléctrica
(Bolívar, 2006)

Clasificación	Conductividad Eléctrica (mmhos/cm)
Suelo no salino	Menos de 2.5
Suelo ligeramente salino	2.5 - 3.5
Suelo medianamente salino	3.5 - 7.0
Suelo altamente salino	7.0 - 15.0
Suelo muy salino	15.0 en adelante

Nitrógeno Total

Las cantidades de nitrógeno en el suelo, en forma disponible para las plantas, son muy pequeñas. Cantidades muy bajas se encuentran en las rocas y en los minerales de los cuales se formaron los suelos provenientes de la atmósfera, el cual contiene una gran reserva de este elemento, pero está en forma de gas inerte que debe combinarse con otros elementos antes de que las plantas puedan usarlo.

El Nitrógeno se puede presentar en los fertilizantes de dos formas: Nitrógeno Nítrico y Nitrógeno Amónico; el primero no necesita transformarse químicamente en el suelo para ser aprovechado por las plantas, por consiguiente, su absorción es más rápida, por el contrario, el Nitrógeno Amónico requiere llevar a cabo efectos de transformación química en el suelo para convertirse en Nitrógeno Nítrico (asimilable para las plantas). La clasificación del suelo de acuerdo al Nitrógeno Total se presenta en cuadro 2.19

Cuadro 2.19 Clasificación del suelo de acuerdo al Nitrógeno Total (**Bolívar, 2006**)

Clasificación	Nitrógeno Total (%)
Extremadamente Pobre	0.050
Pobre	0.050 - 0.099
Medianamente Pobre	0.100 - 0.149
Mediano	0.150 - 0.199
Medianamente rico	0.200 - 0.249
Rico	Más de 0.250

También es importante considerar la relación carbono – nitrógeno, el carbono y el nitrógeno son los dos constituyentes básicos de la materia orgánica. Según **la Organización Panamericana de la salud (1999)** en términos generales, una relación C/N inicial de 20 a 30 se considera como adecuada. Si la relación C/N está en el orden de 10 nos indica que el material tiene relativamente más Nitrógeno. Si la relación es de por ejemplo 40, manifiesta que el material tiene relativamente más Carbono. Un material que presente una C/N superior a 30, requerirá para su biodegradación un mayor número de generación de microorganismos, y el tiempo necesario para alcanzar una relación C/N final.

Fósforo (P)

El fosforo es esencial para el crecimiento de las plantas no puede ser sustituido por ningún otro elemento. El fósforo interviene activamente en la mayor parte de las reacciones bioquímicas complejas de la planta que son la base de la vida: respiración, síntesis y descomposición de glúcidos, síntesis de proteínas.etc. La clasificación del suelo con respecto al Fósforo se indica en el cuadro 2.20.

Cuadro 2.20 Clasificación del suelo de acuerdo al Fósforo (**Bolívar, 2006**)

Clasificación	Fosforo asimilable (Kg/ha)
Extremadamente pobre	0 – 7
Muy pobre	8 -14
Medianamente pobre	15 – 29
Mediano	29 – 56
Medianamente rico	57 – 84
Muy rico	85 – 112
Extremadamente rico	Más de 112

Potasio (K)

El Potasio tiene funciones primordiales como lo son: el desarrollo y crecimiento de flores y frutos; da resistencia a las plantas contra plagas y enfermedades, heladas y sequías; determina la mayor o menor coloración en flores y frutales y el sabor en éstos últimos, esencial para la formación de almidones y azúcares. La clasificación del suelo con respecto al Potasio se indica en el cuadro 2.21.

Cuadro 2.21 Clasificación del suelo de acuerdo al Potasio (**Bolívar, 2006**)

Clasificación	Potasio asimilable (Kg/ha)
Extremadamente pobre	0 – 70
Muy pobre	71 – 140
Medianamente pobre	141 – 210
Mediano	211 – 280
Medianamente rico	281 – 350
Muy rico	351 – 420
Extremadamente rico	Más de 421

Dosis Agronómica basada en el nitrógeno

La parte importante en la estimación de la dosis de aplicación, es el cálculo del nitrógeno contenido en los biosólidos que es disponible para el cultivo durante el primer año (NDB). Para lo anterior se requieren análisis de laboratorio de los biosólidos que incluya el nitrógeno total Kjeldahl (NTK) y el nitrógeno en forma de amonio.

Cuando se utiliza el proceso de estabilización alcalina en los biosólidos, prácticamente todo el amonio se volatiliza y no se toma en cuenta para el cálculo de la dosis de aplicación. Del nitrógeno orgánico, sólo la porción que se mineraliza el primer año es la que se considera para el cálculo de dosis de aplicación; en el caso de biosólidos estabilizados con cal, se asume que aproximadamente el 30 por ciento se mineraliza y es disponible al cultivo durante el primer año (**Bolívar, 2006**).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación Geográfica

El presente trabajo se desarrolló en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, ubicada geográficamente sobre las coordenadas 25° 22' Latitud Norte y 101° 00' Longitud Oeste, con una altura sobre el nivel del mar de 1743 m, localizada en Buenavista, Saltillo, Coahuila, México (Figura 3.1).



Figura 3.1 ubicación geográfica del área del proyecto

Instalación del Biodigestor

Para llevar a cabo este trabajo se realizó la instalación de un biodigestor, la cual se realizó el día 23 de Agosto del 2008. Los materiales que se utilizaron fue un biodigestor Sistema Fosaplas para tratamiento de aguas residuales, el cual tiene una capacidad de 1050 litros; se utilizó una tubería de 3" de diámetro de Polietileno de 12 metros de largo, la cual se conectó a la salida del canal de desagüe de las heces fecales de los puercos de la granja porcina hacia la entrada del biodigestor; al biodigestor se le instalaron dos tramos de tubo PVC, los cuales constaban de 2" de diámetro de 1.20 m de largo y 1 ½" de diámetro de 1.0 m de largo, los cuales sirven para la salida de los lodos. También se instaló una válvula de de ½" para la salida del biogás.

Para realizar las conexiones se utilizaron piezas como válvulas bola de 3", 2" y 1 ½", adaptadores macho de 2" y ½" de PVC, coples cementar de 3" y ½", codos PVC 1 ½" * 90°; reducción bushing de 1 ½" * 1 ½" PVC. También fue necesario utilizar cinta métrica, cemento y limpiador para realizar la instalación de cada una de las partes que lleva el biodigestor (Fig.3.2).



Figura 3.2. Instalación del biodigestor anaerobio

En la figura 3.3 Se puede observar un diagrama del flujo del funcionamiento de dicho biodigestor.



Figura 3.3 Diagrama de flujo del biodigestor

Metodología

Determinación de Parámetros del Líquido y Sólido

Después de cuatro meses de que se instaló el biodigestor, se obtuvieron muestras del efluente líquido y sólido del biodigestor, las cuales se analizaron en el Laboratorio de Calidad de Aguas del Departamento de Riego y Drenaje de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Los parámetros que se realizaron fueron las siguientes:

➤ Análisis Físicos y Químicos para Determinar Calidad del Líquido del Biodigestor

Parámetros que se determinaron para salinidad y sodicidad: pH, CE, carbonatos, bicarbonatos, sulfatos, cloruros, calcio, magnesio y sodio.

Parámetros que se determinaron para la calidad del agua residual: Sólidos Totales (ST), Sólidos Totales Volátiles (STV), Sólidos Suspendidos Totales (SST), Sólidos Totales Disueltos (STD) , Sólidos Sedimentables (SS), Demanda Química de Oxígeno (DQO).

En el cuadro 3.1 se muestran los parámetros, los métodos usados y las normas que los establecen.

Cuadro 3.1 Parámetros determinados en laboratorio

Determinación	Método	NOM
Nitrógeno Total K, mg/L	Kjeldahl	NMX-AA-026-SCFI 2001
Muestreo		Simple.(NMX-AA-003-80)
pH	Potenciómetro	NMX-AA-008
Conductividad Eléctrica	Conductivímetro	NMX-AA-093
Sólidos Sedimentables	Cono Imhoff	NMX-AA-004
Sólidos Totales	Gravimétrico	NMX-AA-034
Sólidos Volátiles	Titulación	NMX-AA-018
Demanda Química de Oxígeno, mg/L	Reflujo Dicromato	NMX-AA-028-SCFI 2001

➤ **Análisis Físicos y Químicos para Determinar la Calidad de Sólido del Biodigestor.**

Parámetros de Fertilidad que se determinaron: pH, C.E., Nitrógeno total, Materia orgánica, Fósforo, Potasio, Carbonatos Totales y Textura.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se discutirán los parámetros que se obtuvieron del líquido, para determinar salinidad, sodicidad y calidad del agua para ser utilizada como agua de riego. De igual manera con los parámetros que se obtuvieron de la muestra del sólido, determinar la calidad del mismo y conocer su nivel de fertilidad.

Salinidad y sodicidad del líquido

Los resultados de los análisis físico-químicos del líquido para determinar salinidad y sodicidad se presentan en el cuadro 4.1.

Cuadro 4.1 Resultado análisis físico y químicos del líquido

Parámetros	Unidades	Resultado
pH	-----	8.44
Conductividad Eléctrica (CE)	μS/cm	4490
Carbonatos ($\text{CO}_3^{=}$)	Meq/l	7.75
Bicarbonatos (HCO_3^-)	Meq/l	40
Sulfatos (SO_4^-)	Meq/l	35.21
Cloruros (Cl^-)	Meq/l	10.5
Calcio (Ca^{++})	Meq/l	6.25
Magnesio (Mg^{++})	Meq/l	8.0
Sodio (Na^+)	Meq/l	35.5

Con los resultados anteriores se realizó la clasificación química del líquido para determinar su uso como agua de riego o biofertilizante (cuadro 4.2), considerando los índices utilizados por el agua de riego.

Cuadro 4.2 Resultados de la calidad química del líquido

Índice	Unidades	Resultado	Clasificación
Conductividad Eléctrica (CE)	$\mu\text{S/cm}$	4490	Muy Altamente salina
Salinidad Efectiva (SE)	Meq/l	79.21	No recomendable
Salinidad Potencial (SP)	Meq/l	28.10	No recomendable
Relación de Absorción de Sodio (RAS)		13.29	Media en sodio
Carbonato de Sodio Residual (CSR)	Meq/l	33.5	No recomendable
Por ciento de Sodio Posible (PSP)	%	44.81	Buena
Contenido de Cloruros (Cl)	Meq/l	10.5	No recomendable

Riesgos de Salinización

La salinización del agua se evalúa normalmente mediante la utilización de tres índices como lo señalan **Palacios y Aceves 1970**: la **Conductividad Eléctrica (C.E.)** que afecta la disponibilidad del agua para el cultivo. Dado que el resultado de la C.E. es de 4490 $\mu\text{S/cm}$, se clasifica como un **agua muy altamente salina**.

Con respecto a la **Salinidad Efectiva (SE)** es un índice de estimación más real del peligro que presentan las sales solubles del agua de riego al pasar a formar parte de la solución del suelo. La salinidad efectiva del líquido fue de 79.21 Meq/l, clasificándose como **agua no recomendable**.

Otro índice a considerar en el líquido, es la **Salinidad Potencial (SP)**. Este índice estima el peligro de estas últimas sales que quedan en solución a bajos niveles de humedad y que por consiguiente, aumentan considerablemente la presión osmótica. Dado que la salinidad potencial es de 28.10 Meq/l, se clasifica como **agua no recomendable**.

Problemas por Sodicidad

Los problemas de sodicidad se determinan mediante los siguientes índices (**Palacios y Aceves 1970**): la **Relación de Absorción de Sodio (RAS)** es de 13.29, de acuerdo a la clasificación se encuentra en un **valor medio** y por lo tanto se tienen que aplicar mejoradores (como el yeso) y es necesario lavar el suelo posteriormente.

En lo que se respecta al **Carbonato de Sodio Residual (CSR)** el resultado que se obtuvo fue de 33.5 Meq/l, clasificándose como **agua no recomendable**.

Otro índice importante es el **Porcentaje de Sodio Posible (PSP)**. El resultado de porcentaje de sodio posible es de 44.81 por ciento, por lo tanto se clasifica como **agua buena** para riego.

Contenido de elementos tóxicos para las plantas

El resultado de **Contenido de Cloruros** es de 10.5 Meq/l, y se clasifica como un **agua no recomendable**, según la clasificación (**Palacios y Aceves 1970**).

Clasificación del agua de riego de acuerdo a la Norma Riverside

Para la clasificación del líquido se utilizó la clasificación del agua de riego según la Norma Riverside (**U. S Soil Salinity Laboratory, 1973**). Encontrándose con una **Conductividad Eléctrica (CE)** alta y un valor medio en la **Relación de Absorción de Sodio (RAS)**. Se tiene un agua correspondiente al **tipo C4-S2**, indica que se trata de un agua de salinidad muy alta que en muchos casos no es apta para el riego. Sólo debe usarse en suelos muy permeables y con buen drenaje, empleando volúmenes en exceso para lavar las sales del suelo, utilizando cultivos muy tolerantes a la salinidad. Además, es un agua con contenido medio en sodio, y por lo tanto, con cierto peligro de acumulación de sodio en el suelo, especialmente en suelos de textura fina (arcillosos y franco-arcillosos) de baja permeabilidad. Deben vigilarse las condiciones físicas del suelo y especialmente el nivel de sodio intercambiable del suelo, corrigiendo en caso necesario.

Parámetros de la calidad del agua residual

Los parámetros que se obtuvieron del análisis del líquido para determinar su calidad, se muestran en el cuadro 4.3.

Cuadro 4.3 Resultados del análisis para determinar calidad del líquido

Parámetros	Unidades	Resultado
pH	-----	8.44
Conductividad eléctrica (C.E.)	μS/cm	4490
Sólidos Totales (ST)	mg/lto	12088.0
Sólidos Totales Volátiles (STV)	mg/lto	3826.0
Sólidos Sedimentables (SS)	mg/lto	0.2
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/lto	992.0
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/lto	7253.0
Sólidos Totales Disueltos (STD)	mg/lto	4835.0

Los parámetros del líquido, se comparan con la norma oficial mexicana (NOM-001-ECOL-1996) que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales (suelo).

pH

Los límites permisibles que establece la NOM-001-ECOL-1996 es de 5 a 10 unidades y comparándolo con el resultado de pH que fue de 8.44, se encuentra dentro del límite permitido.

Conductividad Eléctrica (CE)

La NOM-001-ECOL-1996 no aplica la conductividad eléctrica; pero dado que el resultado es 4490 $\mu\text{S}/\text{cm}$ se clasifica como un lodo líquido muy alto en salinidad y puede afectar el suelo si no se cuenta con un buen drenaje.

Sólidos Totales

El parámetro de sólidos totales no se considera en la norma oficial mexicana (NOM-001-ECOL-1996) pero es importante conocerlo para determinar los sólidos que se incorporaran al suelo.

Sólidos Totales Volátiles

Este parámetro tampoco aplica para la NOM-001-ECOL-1996; pero tiene gran importancia para determinar la estabilidad biológica.

Sólidos Sedimentables

En el cuadro No. 4.3 se puede observar que se obtuvo un valor bajo de sólidos sedimentables, de acuerdo a la Nom-001-ECOL-1996 no aplicando para el agua, pero es importante porque éstos se incorporaran al suelo para la aportación de N.

Demanda Química de Oxígeno

la NOM-001-ECOL-1996 no aplica este parámetro. Pero se emplea para medir el contenido materia orgánica tanto en aguas naturales como residuales que contengan compuestos tóxicos para la vida, no aplicando este parámetro en el caso de agua residual, pero en el de lodo es importante, ya que indica la carga orgánica contenida en los biosólidos líquidos.

Sólidos Suspendidos Totales

El resultado de los sólidos suspendidos es un valor alto, realizando una comparación con la NOM-001-ECOL-1996 no aplica para el agua residual, pero son importantes para el suelo, ya que la materia orgánica incrementara la fertilidad en el suelo y modificara la conductividad hidráulica, densidad aparente y la capacidad de retención de agua.

Sólidos Totales Disueltos

En la NOM-001-ECOL-1996 no se especifica este parámetro, pero son moléculas orgánicas e inorgánicas, así como iones en solución, que afectaran la conductividad eléctrica del suelo, lo que repercutirá en el rendimiento de los cultivos.

Calidad y fertilidad de los sólidos

En el cuadro 4.4 se muestran los resultados del análisis físico-químico del sólido para determinar su fertilidad.

Cuadro 4.4 Resultados del análisis físico-químico del sólido

Parámetros	Resultado
pH	8.16
C.E. dS/m	4.41
Nitrógeno Total %	0.22
Materia Orgánica %	13.43
Fósforo Kg/ha	más de 112.5
Potasio Kg/ha	más de 900
Carbonatos Totales %	11.8
Arcilla %	1.6
Limo %	54.0
Arena %	44.4
Textura	Franco-Limoso

Características Físicas

Textura

En el cuadro anterior se puede observar, que el tipo de textura fue **franco-limoso**, corresponde a la mejor textura, que le da al suelo una excelente condición para el uso para las plantas.

Características Químicas

pH

Como se puede observar en la cuadro anterior, el pH del sólido fue de 8.16 siendo un valor elevado y se clasifica como **medianamente alcalino**.

Conductividad Eléctrica (CE)

Dado que la Conductividad Eléctrica (C.E.) contenida en el sólido fue de 4.41 dS/m, se puede concluir que es un sólido **medianamente salino**. Siendo importante tomada en cuenta como lo considera Martínez (1998) que es recomendable tomar en cuenta la salinidad del lodo, sobre todo en las regiones áridas o de poca precipitación, ya que al encontrarse en grandes cantidades en los suelos pueden impedir la germinación y el óptimo desarrollo de los cultivos.

Nitrógeno Total

Con el resultado que se obtuvo de nitrógeno total se determino que es un sólido **medianamente rico**, ya que como lo reporta (Sánchez, 2007) el nitrógeno es un constituyente y activador de todas las enzimas, que intervienen en procesos de absorción iónica, fotosíntesis, respiración, síntesis, multiplicación y diferenciación celular.

Fósforo (P)

El resultado obtenido con respecto al fósforo, este sólido se clasifica como **muy rico**, lo que ayudara a un buen desarrollo vegetativo, germinación de la semilla, desarrollo de la raíz, maduración temprana y en la actividad del protoplasma, además es parte importante en los procesos químicos que se efectúan en el interior de las mismas, como lo considera **Ortiz (1972)**.

Potasio (K)

El Potasio que contiene el sólido dado el resultado que se obtuvo se puede decir que es **muy rico**.

Navarro (2003) El potasio es una de los nutrimentos principales junto con el N y el P. el potasio es absorbido por las plantas en forma iónica K^+ . Desempeña funciones importantes en las plantas como es la fotosíntesis, en la regulación hídrica de la planta y muy especialmente como activador enzimático.

Relación Carbono/Nitrógeno (C: N)

El carbono y el nitrógeno son los dos constituyentes básicos de la materia orgánica.

$$\% \text{ de C orgánico} = \% \text{ materia orgánica} / 1.724$$

$$13.43/1.724 = 7.79 \% \text{ C orgánico}$$

La relación **C: N = 7.79/0.22 = 35.41**, el resultado que se obtuvo de esta relación C: N es un valor alto, según **la Organización Panamericana de la salud (1999)** hay una deficiencia de nitrógeno y relativamente más carbono. Una relación de C/N superior a 30, requerirá para su biodegradación un mayor número de generación de microorganismos, y el tiempo necesario para alcanzar una relación C/N final.

Dosis Agronómica

Dado que el resultado de NTK fue de 0.22 por ciento (en base a peso seco), se realizó el cálculo para la aportación de nitrógeno por tonelada de biosólidos:

$$1000 \text{ kg/ton} * 0.0022 \text{ kg N/kg biosólido} = 2.2 \text{ kg N/tonelada biosólido}$$

Como solo el 30 por ciento del Nitrógeno orgánico se mineraliza (y es aprovechable) durante el primer año, el nitrógeno disponible en el biosólido (NDB) el **primer año es:**

$$\text{NDB} = 2.2 * 0.30 = 0.66 \text{ kg N/tonelada biosólidos}$$

Efecto residual

Cuando se requiere realizar aplicaciones sucesivas en una misma parcela, es necesario tomar en cuenta la mineralización de nitrógeno durante el año siguiente al de la aplicación. Para el caso de los biosólidos estabilizados con cal, se considera que un 15 por ciento del NTK se mineraliza durante el segundo año y un 5 por ciento durante el tercer año. Los biosólidos aportarán durante el **segundo año:**

$$2.2 \text{ kg N/tonelada biosólido} * 0.15 = 0.33 \text{ kg N/tonelada biosólidos}$$

y durante el **tercer año:**

$$2.2 \text{ kg N/tonelada biosólido} * 0.05 = 0.11 \text{ kg N/tonelada biosólidos}$$

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El líquido del biodigestor tiene un pH de 8.44 lo que puede afectar la actividad biológica, la conductividad eléctrica es alta, los resultados de los índices de la calidad química clasifica en la mayoría de éstos al líquido como no recomendable.

Los parámetros que se obtuvieron de la calidad de líquido, se obtuvieron valores elevados y dado que la norma oficial mexicana en la mayoría de estos parámetros no aplica, es necesario realizar un control de aplicación o descarga de estos efluentes.

La fertilidad del sólido al igual que en el líquido, se obtuvieron valores elevados en parámetros como pH con un valor de 8.16 y conductividad eléctrica de 4.41dS/m. En lo que corresponde a Nitrógeno se obtuvo un valor bajo y en la relación carbono-nitrógeno (C: N) se observó que hay deficiencia de nitrógeno en el sólido.

Se recomienda tener un mejor manejo del biodigestor ya que los valores obtenidos de los parámetros tanto del líquido y sólido son elevados. Para así obtener un biosólido líquido de calidad agronómica.

VI. LITERATURA CITADA

- Barrios, P. y J.A. 2004. Tratamiento y aplicación de lodos residuales en México. Grupo de tratamiento y reuso del instituto de ingeniería UNAM. Memorias del sexto congreso de Químicos Farmacéuticos Biólogos. Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Bolívar, D.M. 2006. Apuntes de uso y tratamiento de aguas residuales. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buenavista. Saltillo. Coahuila. México.
- Bontoux, L. M. 1999. Tratamiento de las aguas residuales urbanas en Europa: el problema de los lodos.
- Carballo, A.L. 2007. Artículo. Biomasa: alternativa sustentable para la producción de Biogás. Universidad de Pinar del Río. "Hermanos Saíz Montes de Oca". Facultad de Forestal y Agronomía. Departamento de Química.Cuba.<http://www.monografias.com/trabajos48/biomasa/biomasa.html>
- Castro, R. 2003. Estudio preliminar de aplicación de biosólidos en suelos para control de erosión y estabilización de taludes. 2-3. Universidad de los Andes.

Fondo para la Agricultura y la Alimentación (FAO). 1995. Artículo. Biodigestor de plástico de flujo continuo, generador de gas y bioabono a partir de aguas servidas. CIPAV Fundación Centro para Investigación en Sistemas Sostenibles de Producción Agropecuaria. Guatemala, Guatemala.

Figuroa, V.U. 2002. Uso de biosólidos en suelos agrícolas. INIFAP. Campo experimental La Laguna. http://www.coecyt-coah.gob.mx/01/02_02_03/coecyt.

Fondahl, L. 1999. Biosolids management In the Western region, Biocycle July. pp. 70-74.

Fresquez, W., 1990. Aprovechamiento de biosólidos en la agricultura. www.espanol.geocities.com.

Flores, M.J.P. 2003. Manejo y biodegradación de Biosólidos Aplicados a la agricultura. Ponencia presentada en la XV Semana Internacional de Agronomía de la Universidad Juárez del estado de Durango. Gómez Palacio. Dgo.

Gamrasni, M.A. 1985. Aprovechamiento Agrícola de Aguas Negras Urbanas. Asociación Francesa para el Estudio de las Aguas. Ed. Limusa. México. Pp.137.

Instituto Mexicano de Tecnología del agua. (IMTA). 1993. Tratamiento Anaeróbico de Aguas Residuales. Instituto de Ingeniería UNAM.

Kiely, G. 1999. Ingeniería Ambiental. 1ª Edición. Mc Graw Hill. Aravaca Madrid. España. pp. 823-831.

- Koenig, R.; D. Miner and K. Goodrich. 1998. Land application of biosolids a guide for farmers. AGWN-02. <http://ext.usu.edu>. capturado 21/09/05
- Luna, G. 2002. Actividad microbiana en suelos. Revista; avance y perspectiva. Vol.21
- Mandujano, M. 1981. Biogás: Energía y fertilizantes a partir de desechos orgánicos. Manual para el promotor de la tecnología. Organización Latinoamericana de Energía. Cuernavaca, Morelos, México.
- Martínez, R.E. 1998. Estudio para determinar el uso de lodos sobre los suelos agrícolas de cuatro municipios de Nuevo León. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo. Coahuila. Pp.187.
- Metcalf & Eddy, Inc.1997. Ingeniería Aguas Residuales. Tratamiento, Vertido y Reutilización. Ed. Mc-Graw-Hill. Mx. 480-481-752 pp.
- Navarro, G.B. 2003. Química agrícola. El suelo y los elementos químicos esenciales para la vida vegetal. Edit. Mundi – prensa. México.
- Norma Oficial Mexicana.NOM-004-SEMARNAT-2002.Proteccion Ambiental-Lodos y Biosólidos-Especificaciones y Límites Máximos Permisibles de contaminantes para su Aprovechamiento y Disposición Final.
- Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996. Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas residuales en aguas y bienes nacionales. México. D.F.
- Organización Panamericana de la Salud (OPS). 1999. Manual para la elaboración de compostas bases conceptuales y procedimientos.

- Ortiz, V.B. 1972. Edafología. Edit. Limusa. México.
- Palacios, V.O. y N.E. Aceves. 1970. Instructivo para el muestreo, registro de datos e interpretación de la calidad del agua de riego agrícola. Colegio de posgraduados de Chapingo. Méx.
- Pissani, Z.J.F. 1990. Tratamiento y Aprovechamiento Agrícola de las Aguas y Lodos Residuales. Apuntes. Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de Nuevo León. Marín, N.L.
- Pizarro, F. 1978. Drenaje agrícola y recuperación de suelos salinos. Ed. Agrícola. Española.
- Sánchez, V.J. 2007. Artículo. Fertilidad del suelo y nutrición mineral de plantas. Fertite S.A.
- Santiago, E. 2000. Apuntes: Tratamiento de Aguas Residuales. Especialización en Ingeniería Ambiental. Instituto Tecnológico de Saltillo.
- Seoanez, C.M. 1995. Aguas Residuales Urbanas. Tratamientos Naturales de Bajo Costo y aprovechamiento. Colección Ingeniería Medioambiental. Editorial. Mundi - Prensa, España. p. 363.
- Smith, E. 1996. Agricultural recycling of Sewage Sludge and the environment. Cab. Internacional.
- Sullivan, E. 1998. Desarrollo de prácticas de biosólidos.
www.conicyt.cl/fondef/bases/fondef

Tester, A. 1990. Artículo. Aplicación de Biosólidos como mejorador de suelos. <http://14683.41.79/profesor/verolagos/d01i1034>

Torres, G.G. y V.R. Zárate. 1996. Estudio técnico sobre la factibilidad de tratamiento, manejo y disposición de los lodos residuales de la planta de tratamiento. Agua industrial Monterrey, S. de U., Monterrey, N.L. Pp.182.

U.S. soil salinity laboratory. 1973. Norma Riverside. Fuente: Blasco y de la Rubia.

Vigueros, L.C. y T. Ortiz. 2000. Características y efectos de los residuos peligrosos. SEMARNAT. CNA. IMTA.

Water Environmental Federation (WEF).1996. Operation of Municipal Wastewater Treatment Plants. Manual of Practice-Mop 11. Volumen3. Alexandria, Va.USA. pp. 965-1351.

Páginas Web Consultadas:

El biogás para la generación de electricidad. 1997. Pag.Web: <http://www.proyectosfindecarrera.com/biogás-para-electricidad>.

Luis Alberto Morga Cancino

Correo electrónico: morga_500@hotmail.com