



FACTIBILIDAD DE APROVECHAMIENTO DE LOS LODOS RESIDUALES DE LA PTAR DEL MUNICIPIO DE CHINAVITA (BOYACÁ)

MARTHA LUCÍA VALDERRAMA PEDRAZA

Universidad de Manizales
Facultad de Ciencias Contables Económicas y Administrativas
Maestría en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente
Manizales, Colombia
2013

FACTIBILIDAD DE APROVECHAMIENTO DE LOS LODOS DE LA PTAR DEL MUNICIPIO DE CHINAVITA (BOYACÁ)

MARTHA LUCÍA VALDERRAMA PEDRAZA

Tesis o trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente

Directora:
M. Sc. GLORIA LUCÍA CAMARGO MILLÁN

Línea de Investigación:
Biosistemas Integrados (BSI)

Grupo de Investigación:
Centro de investigaciones en Medio Ambiente y Desarrollo CIMAD

Universidad de Manizales
Facultad de Ciencias Contables Económicas y Administrativas
Maestría en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente
Manizales, Colombia
2013

Agradecimientos

La autora agradece a la Ing. Gloria Lucía Camargo Millán, Ingeniera Química, M. Sc. en Ingeniería Civil, Área de Ambiental, asesora del trabajo de investigación por la orientación y acompañamiento; de igual forma a Lida Isabel Bohórquez Pedreros Administradora de Empresas, Gerente de la Empresa Solidaria de Servicios Públicos de Chinavita, por permitir el acceso a la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) del municipio de Chinavita y brindar la información requerida y un agradecimiento especial a Oscar Hernando Morales Morales, mi esposo, por su gran apoyo y colaboración.

Resumen

Con el fin de tener un criterio sobre el tipo de lodos que se generan en la planta de tratamiento de aguas residuales PTAR del municipio de Chinavita y a la vez determinar las posibilidades de manejo de estos residuos, se realizó un muestreo de lodos y la determinación de su contenido mediante análisis agronómico, contenido de metales pesados y análisis microbiológico, al comparar los resultados de los análisis y evaluar de acuerdo a los parámetros y normatividad establecida según la EPA 40 CFR parte 503, se proponen alternativas para la estabilización química con la utilización de caly estabilización biológica mediante digestión anaerobia; seleccionando la estabilización química, por facilidad de implementación. Con el contenido de materia orgánica de los lodos y la estabilización química para reducción de patógenos a niveles por debajo del límite de la norma, se busca que puedan ser utilizados en plantaciones forestales y de ornato, en la recuperación de suelos degradados y en la elaboración de abonos y enmiendas, sin restricciones.

Palabras clave: lodo residual, metales pesados, patógenos, estabilización

Abstract

In order to have an opinion on the type of sludge generated in the wastewater treatment plant Chinavita Township WWTP and also to determine the possibilities of handling this waste, sampled sludge and determining its contents through agronomic analysis, heavy metal contents and microbiological analysis. When comparing the results of the analysis and evaluated according to standards parameters established and EPA 40 CFR part 503, alternatives are proposed for chemical stabilization with the use of lime and biological stabilization anaerobic digestion; selecting the chemical stabilization, by ease of implementation. With the organic matter content of the sludge and chemical stabilization to reduce pathogens to levels below the limit of the standard, it is intended that can be used in forest plantations and ornamental, recovery of degraded soils and production of fertilizers and amendments, no restrictions.

Key words: sewage sludge, heavy metals, pathogens, stabilization

Contenido

	Pág.
Resumen	VII
Lista de figuras	XI
Lista de tablas	XII
Introducción	13
1. Marco teórico	15
1.1 Lodos de aguas residuales	15
1.1.1 Tipos de lodos.....	16
1.1.2 Clasificación de los lodos	17
1.1.3 Mecanismos para tratamiento de lodos	18
1.1.4 Factores limitantes en los lodos	20
1.1.5 Destino de los lodos.....	25
1.2 Biosólidos	29
1.3 Lagunas de estabilización.....	30
1.3.1 Lagunas facultativas	32
1.3.2 Tanque Imhoff.....	33
2. Antecedentes	36
3. Metodología	39
3.1 Área de estudio.....	39
3.2 Caracterización de los lodos de la PTAR del municipio de Chinavita.....	42
3.2.1 Procedimientos de muestreo.....	43
3.2.2 Parámetros a analizar	44
3.2.3 Alternativas para reducción de organismos patógenos	46
3.2.4 Selección de alternativas para utilización de los lodos	46
3.2.5 Impacto económico, social y ambiental del aprovechamiento de lodos.....	47
4. Resultados y Discusión	48
4.1 Caracterización de lodos	48
4.1.1 Parámetros agronómicos analizados	48
4.1.2 Análisis de metales pesados	51
4.1.3 Análisis microbiológico	52
4.2 Alternativas para reducción de organismos patógenos	53
4.3 Alternativas para el aprovechamiento de los lodos residuales	58
4.4 Impacto económico, social y ambiental del aprovechamiento de los lodos	61
4.4.1 Económico	61

4.4.2	Social.....	61
4.4.3	Ambiental.....	62
5.	Conclusiones y recomendaciones	64
5.1	Conclusiones.....	64
5.2	Recomendaciones.....	65
A.	Anexo: Resultado del Análisis Agronómico	66
B.	Anexo: Resultados del Análisis Microbiológico.....	67
C.	Anexo: Resultado del Análisis de Metales Pesados	69
	Bibliografía.....	71

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1: Etapas de la estructura de valorización de los lodos, procesos y productos a obtener.....	29
Figura 1-2: Sección transversal de una laguna construida por excavación y formación de bordos.....	31
Figura 1-3: Laguna Facultativa.....	33
Figura 1-4: Tanque Imhoff.....	35
Figura 3-1: Localización del municipio de Chinavita.....	39
Figura 3-2: Laguna de Oxidación de la PTAR en el municipio de Chinavita.....	40
Figura 3-3: Estructuras de la PTAR Chinavita (a) Rebosadero de excesos, (b) y (c) Canal de entrada con rejillas, (d)y (e) Trampa de grasas, (f) Canaleta Parshall	41
Figura 3-4: Estructuras PTAR Chinavita (a) Tubería de conducción, (b) y (c) Tanques Imhoff, (d) Lecho de secado, (e) Lagunas de oxidación, (f) Estructura de descarga.....	42
Figura 3-5: Muestreo de lodos para análisis de laboratorio.....	42
Figura 3-6: Muestras de lodos para envío a laboratorio	44

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1-1: Concentración de metales y tasas de carga según la regulación 503 de la EPA.....	17
Tabla 1-2: Límite de calidad microbiológica.....	18
Tabla 1-3: Características de los metales pesados	21
Tabla 1-4: Concentración característica de algunos metales pesados en lodos (g/g) de sólidos volátiles	22
Tabla 1-5: Concentraciones críticas de metales que permiten procesos biológicos.....	22
Tabla 1-6: Límites máximos de metales pesados	23
Tabla 1-7: Concentración máxima de microorganismos patógenos.....	24
Tabla 3-1: Parámetros Análisis agronómico CALS-ICONTEC, Laboratorio Suelos y aguas UPTC	44
Tabla 3-2: Parámetros metales analizados en la UPB, Laboratorio Ambiental.....	45
Tabla 3-3: Parámetros Microbiológicos analizados en la UPTC, Laboratorio de Microbiología.....	46
Tabla 4-1: Parámetros metales analizados en la UPB, Laboratorio Ambiental.....	48
Tabla 4-2: Parámetros y resultado del Análisis Metales pesados	51
Tabla 4-3: Parámetros y resultado del Análisis Microbiológico	52
Tabla 4-4: Costo total de la materia prima para estabilización de lodos residuales PTAR Chinavita	57
Tabla 4-5: Alternativas de aprovechamiento de los lodos de la PTAR Chinavita.....	59

Introducción

La purificación del agua mediante el uso de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) conlleva a la generación de subproductos principalmente lodos, los cuales presentan entre otros compuestos: materia orgánica, nutrientes, metales pesados y presencia de organismos patógenos, encontrándose la mayoría de las veces dificultades para su aprovechamiento y disposición final; entre las alternativas existentes están su uso como cobertura final en rellenos sanitarios, la incineración, la aplicación como mejoradores de suelos, el aprovechamiento como estabilizadores de taludes en vías, y la elaboración de materiales de construcción.

La disposición en rellenos sanitarios es una alternativa interesante debido a que se utiliza como abono y se logra una excelente cobertura final de la celdas, el inconveniente es que no se requieren permanentemente y se disponen solamente en el relleno sanitario como un residuo sólido, reduciendo la vida útil del relleno por las altas cantidades de lodos generados; la incineración acarrea altos costos, dificultad de conseguir hornos incineradores apropiados, de tal forma que no se generen emisiones de dioxinas y furanos y dificultad para la disposición final de las cenizas; como mejoradores del suelo puede ser utilizado por su alto contenido en materia orgánica y nutrientes pero su aplicación se encuentra condicionada a la concentración de metales pesados y microorganismos patógenos presentes.

Los lodos contienen el mismo tipo de microorganismos patógenos que el agua residual, pero en una mayor concentración debido a la reducción del contenido de agua por espesamiento o deshidratación, su aplicación directa a cualquier cuerpo receptor (suelo, fuentes superficiales, mar) sin tratamiento previo representa un riesgo para la salud humana y biótica; por lo cual la concentración de coliformes y huevos de Helminthos encontradas en los lodos implica procesos de estabilización y restricciones en su uso.

La peligrosidad de los metales pesados reside en que no pueden ser degradados (ni química, ni biológicamente) y, además, tienden a bioacumularse y a biomagnificarse (se acumulan en los organismos vivos alcanzando concentraciones mayores que la que alcanzan en los alimentos o medioambiente, y que estas concentraciones aumentan a medida que ascendemos en la cadena trófica), provocando efectos tóxicos de muy diverso carácter, afectan a las cadenas alimenticias, provocando un efecto de bioacumulación entre los organismos de la cadena trófica al no tener, la mayoría de éstos, una función biológica definida. El tratamiento de los lodos como mejoradores de suelos permite una valorización del residuo gracias a los nutrientes que contiene, a la vez que mejora las características del suelo, por lo cual surge la necesidad de encontrar alternativas de disposición final evitando el riesgo que ellos suponen para el medio ambiente y para la salud.

Debido a que en Colombia se está trabajando en el saneamiento de las cuencas de varios ríos entre los que se pueden mencionar el río Bogotá, Cauca, Chicamocha, entre otras, se espera una generación, acumulación y problemas para el almacenamiento y disposición final adecuada, de los lodos producidos por el funcionamiento de las PTAR correspondientes, generando focos de contaminación, dificultando su adecuada gestión causando impactos en el medio ambiente que suponen un riesgo para el ser humano, animales y plantas.

En el caso específico del departamento de Boyacá, se están construyendo las PTAR de los principales municipios como Tunja, Sogamoso y próximamente, Duitama; ya se cuenta con algunas PTAR como la de Paipa, Almeida, Macanal, Chinavita, Nobsa, Jenesano y Togüí entre otras, más aún falta la implementación de las mismas en más del 80% de los municipios del departamento. La preocupación de las administraciones públicas de los municipios, donde se están construyendo las PTAR, se encuentra en la búsqueda de una solución factible de implementar para el destino final de los lodos, con el mínimo impacto ambiental y que permita a su vez la valorización de las materias que éstos contienen.

Las políticas actuales y las prospectivas a futuro se han enfocado hacia la búsqueda de alternativas para la transformación del lodo en un material útil para ser dispuesto en el suelo debido a que cada vez son menores las áreas aptas para la construcción de sitios de disposición final y por su composición en materia orgánica, macro y micronutrientes que hacen que su contribución al suelo sea de suma importancia, en lo que respecta al ahorro de recursos en la compra de fertilizantes, además de proporcionar una mejora en las características físicas, químicas y biológicas del suelo, lo que se traduce en bajos costos de disposición final e impactos positivos al ambiente por el reciclaje de nutrientes en el suelo.

El trabajo de investigación está encaminado a la búsqueda de soluciones para el manejo y disposición final de los lodos generados en la PTAR del municipio de Chinavita, como una necesidad de presentar la salida más adecuada, ya que hace parte del incremento en la producción de residuos sólidos urbanos, generados debido al aumento de la población y a la emigración de los habitantes rurales a zonas urbanas.

El objetivo general de este estudio es evaluar la factibilidad de aprovechamiento de los lodos generados en la PTAR del municipio de Chinavita (Boyacá) mediante la caracterización química y microbiológica de los lodos producidos en PTAR municipal, con el fin de determinar la concentración de metales pesados, coliformes totales, coliformes fecales, *Salmonella* y huevos viables de Helminto; presentando una alternativa de estabilización de los mismos con lo se logre reducir el impacto ambiental que produce la generación de estos lodos y contribuir al proceso de gestión integrada de aguas residuales de la PTAR municipal, constituyéndose en una posibilidad de disposición final y generación de bienestar, enmarcándose dentro de las políticas del desarrollo sostenible.

1. Marco teórico

1.1 Lodos de aguas residuales

Son un subproducto del tratamiento de las aguas residuales, se pueden generar durante los tratamientos primario (físico y/o químico), secundario (biológico) y terciario; representan un residuo acuoso, más o menos diluido, con una amplia variedad de coloides y otras partículas en diferentes formas; pueden existir también varios contaminantes peligrosos, como sales, contaminantes orgánicos y metales pesados. La cantidad de lodo producida depende de la eficiencia, del tipo de tratamiento (los fisicoquímicos y los biológicos aerobios producen más lodo que los biológicos anaerobios) y de la carga contaminante inicial del agua residual (Colomer *et al.*, 2010).

Se denomina aguas servidas a aquellas que resultan del uso doméstico o industrial del agua; se les llama también aguas residuales, aguas negras o aguas cloacales. Son residuales, habiendo sido usada el agua, constituyen un residuo, algo que no sirve para el usuario directo; son negras por el color que habitualmente tienen, y cloacales porque son transportadas mediante cloacas nombre que se le da habitualmente al colector; están constituidas por todas aquellas aguas que son conducidas por el alcantarillado e incluyen, a veces, las aguas de lluvia y las infiltraciones de agua del terreno (Martínez, 2011).

Las diferentes actividades productivas y domésticas producen grandes cantidades de aguas residuales, las cuales contienen una diversidad amplia de contaminantes; estas aguas deben ser procesadas en las Plantas de Tratamiento de Aguas residuales PTAR para su reuso o disposición con una calidad mayor (Trejos, 2012). En el tratamiento de aguas residuales, se pueden distinguir hasta cuatro etapas que comprenden procesos químicos, físicos y biológicos:

- Tratamiento preliminar, de acuerdo con Escobar (2011) está destinado a la eliminación de residuos fácilmente separables y en algunos casos un proceso de pre-aireación. Martínez, (2011) menciona que debe realizarse por medio de procesos físicos y/o mecánicos, como rejillas, desarenadores y trampas de grasa, dispuestos convencionalmente de modo que permitan la retención y remoción del material extraño presente en las aguas negras y que pueda interferir los procesos de tratamiento. Debe cumplir dos funciones:

. Medir y regular el caudal de agua que ingresa al sistema, con estructuras como canaletas Parshall, vertederos, piezómetros, etc.

. Extraer los sólidos flotantes grandes y la arena, a través de tamices o cribas.

▪ **Tratamiento primario**, que comprende procesos de sedimentación y tamizado. Tiene como objetivo remover los sólidos en suspensión por medio de un proceso de sedimentación simple. Para complementar este proceso se pueden agregar compuestos químicos con el objeto de precipitar el fósforo, los sólidos en suspensión muy finos o aquellos en estado de coloide (Martínez, 2011).

▪ **Tratamiento secundario**, que comprende procesos biológicos aerobios, anaerobios y fisicoquímicos (floculación) para reducir la mayor parte de la DBO (Demanda Biológica de Oxígeno), según Escobar (2011). Tiene como objetivo remover los sólidos en solución y en estado coloidal mediante un proceso de naturaleza biológica seguido de sedimentación. Este proceso biológico es un proceso natural controlado en el cual participan los microorganismos presentes en el agua servida más los que se desarrollan en el estanque secundario. Estos microorganismos, principalmente bacterias, se alimentan de los sólidos en suspensión y estado coloidal produciendo en su degradación en anhídrido carbónico y agua, originándose una biomasa bacteriana que precipita en el estanque secundario (Martínez, 2011).

▪ **Tratamiento terciario** o avanzado que está dirigido a la reducción final de la DBO, metales pesados y/o contaminantes químicos específicos y la eliminación de patógenos y parásitos. Martínez, (2011) comenta que tiene como objetivo remover algunos contaminantes específicos presentes en el agua servida tales como los fosfatos que provienen del uso de detergentes domésticos e industriales y cuya descarga en curso de agua favorece la eutroficación, es decir, un desarrollo incontrolado y acelerado de la vegetación acuática la que agota el oxígeno, mata la fauna existente en el sector. Dentro del tratamiento de las aguas de desecho para la eliminarles los nutrientes están la precipitación, la sedimentación y la filtración. No todas las plantas tienen esta etapa ya que dependerá de la composición del agua servida y el destino que se le dará.

1.1.1 Tipos de lodos

Depende del nivel de tratamiento de las aguas residuales:

- **Lodos de decantación primaria:** provenientes de decantación primaria son generalmente de consistencia limosa y color de marrón a gris, volviéndose sépticos y dando mal olor con gran facilidad.
- **Lodos de precipitación química:** son generalmente de color negro y su olor, aunque puede llegar a ser desagradable, es menor que los de decantación primaria típica y la velocidad de descomposición de los lodos es mucho menor.
- **Lodos de tratamiento secundario:** son de color marrón, relativamente ligeros, y por estar bien aireados en el caso general, no suelen producir olor con tanta rapidez como los fangos primarios; por no estar suficientemente aireados, su color se oscurece y producen un olor tan fuerte como el lodo primario.

- **Lodos provenientes de lechos bacterianos:** color marrón y no producen olores molestos si están frescos; se degradan a una velocidad menor que los lodos procedentes del sistema secundario de lodos activados, salvo en el caso de que contengan una preponderancia de organismos superiores (por ejemplo, gusanos), en cuyo caso pueden llegar a dar malos olores muy rápidamente.
- **Lodos digeridos:** color entre marrón oscuro y negro, y contienen cantidades relativamente grandes de gas, si está bien digerido prácticamente no produce olor o produce un olor relativamente débil que no es desagradable.

1.1.2 Clasificación de los lodos

Los lodos se clasifican principalmente de acuerdo al contenido de metales pesados y a su calidad microbiológica:

- **Lodo peligroso:** presencia de contaminantes tóxicos de acuerdo a lo establecido por la EPA (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos) en sus apartados 260 y 261.
- **Lodo no peligroso:** las concentraciones de sus componentes son inferiores a los valores establecidos por la EPA en sus apartados 260 y 261.

Los lodos no peligrosos pueden ser de Buena Calidad o de Mala Calidad según su contenido de metales pesados en forma más rigurosa según la normatividad propuesta por la EPA, "Concentración del componente para una calidad excepcional". Tabla 1-1.

Tabla 1-1: Concentración de metales y tasas de carga según la regulación 503 de la EPA.

ELEMENTOS	Valores Límite (mg/Kg mat. Seca)	Tasa de carga acumulativa del elemento, (Kg/Ha)	Concentración del componente para una calidad excepcional, (mg/Kg)	Tasa de carga anual del elemento (Kg/Ha/año)
Arsénico	75	41	41	2.0
Cadmio	85	39	39	1.9
Cromo	-	-	-	-
Cobre	4300	1500	1500	75
Plomo	840	300	300	15
Mercurio	57	17	17	0.85
Molibdeno	75	-	-	-
Níquel	420	420	420	21

Selenio	100	100	100	5.0
Zinc	7500	2800	2800	140

Fuente:EPA

De acuerdo con los límites de calidad microbiológica de la EPA presentados en la Tabla 1-2 un lodo de buena calidad, se clasifica como Lodo Clase A o Lodo Clase B:

Lodo Clase A: no contienen niveles detectables de agentes patógenos, satisfacen los requerimientos estrictos de reducción de atracción de vectores y niveles bajos de contenido de metales y sólo tienen que solicitar permisos para garantizar que estas normas tan estrictas han sido cumplidas.

Lodo Clase B: reciben tratamiento, pero aún contienen niveles detectables de agentes patógenos; estos tienen restricciones al acceso público. La planeación del manejo de nutrientes garantiza que se apliquen biosólidos a la tierra agrícola en las cantidades y las calidades apropiadas.

Tabla 1-2: Límite de calidad microbiológica de lodos.

PARÁMETRO	LODO CLASE A	LODO CLASE B
Coliformes Fecales o Salmonella	<1000 NMP/g o UFC/g <3 NMP/4g	<2000000 NMP/g o UFC/g
Huevos de helminto	1 huevo viable/4 g	-

Fuente: EPA

La EPA (Agencia de Protección Ambiental) de Estados Unidos) publicó la reglamentación concerniente a los sólidos biológicos, su uso y disposición bajo el Code of Federal Regulations (CFR), 40 CFR parte 503 de 1993. Para la aplicación en suelo, la reglamentación ofrece límites numéricos a 10 metales, guía en la práctica de manejo, requerimientos para el monitoreo, almacenamiento de registros y su publicación. Aspectos:

- Límite de metales.
- Prácticas de manejo.
- Alternativas para la reducción de organismos patógenos.
- Reducción de vectores.
- Restricciones para su disposición en suelos.

1.1.3 Mecanismos para tratamiento de lodos

La reglamentación que propone una clasificación de los lodos según su caracterización microbiológica, plantea mecanismos de tratamiento de los mismos para mejorar su

calidad microbiológica, proporciona información sobre métodos analíticos y procedimientos de muestreo es el Control de patógenos y atracción de vectores en los lodos residuales (Control of Pathogens and Vector Attraction in Sewage Sludge). EPA/625/R-92/013 de 1999. (Including Domestic Septage) Under 40 CFR Part 503. Los procesos de tratamiento del lodo son clasificados en cuanto a su capacidad de remoción de organismos patógenos en Procesos de Reducción Avanzada de Patógenos (PFRP) y Procesos de Significativa Reducción de Patógenos (PSRP).

Los procesos reconocidos por la EPA como Procesos de Significativa Reducción de Patógenos PRSP son:

- **Secado:** el lodo de agua residual es secado al aire, durante un mínimo tres meses. Dos de los tres meses a una temperatura media diaria ambiente superiora 0°C.
- **Estabilización térmica:** un lodo resultante de estos procesos de tratamiento, es denominado tipo A, según las condiciones especificadas por la norma EPA 40, el contenido de bacterias patogénicas, virus entéricos y huevos viables de helmintos son reducidos a los niveles detectables indicados en la normatividad. Estos lodos pueden ser aplicados en suelo para uso agrícola sin restricciones. Este lodo debe ser monitoreado para parámetros de huevos de helminto, coliformes fecales, *Salmonella* sp., asegurando que no ocurra recrecimiento.
- **Compostaje:** constituye una forma viable de estabilización de los lodos generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales - PTAR; es un proceso en el cual la materia orgánica se degrada biológicamente hasta lograr un producto final estable. Aproximadamente del 20 al 30% de los sólidos volátiles son convertidos a dióxido de carbono y agua; adicionalmente las temperaturas alcanzadas pueden llegar a valores entre 50 y 60 °C que destruyen los organismos patógenos. El proceso de compostaje facilita su disposición final al poderlos aplicar directamente en áreas de cultivo para incrementar la producción y enriquecer o mejorar la calidad y estructura del suelo, mejorando el aporte de carbono, nitrógeno, azufre, potasio y fósforo y algunos micronutrientes como zinc, hierro y cobre que propician una situación favorable para el desarrollo de las plantas, sin embargo, su aplicación puede verse limitada por la presencia de algunos compuestos como los metales pesados presentes en los lodos (Torres *et al.*, 2008).
- **Digestión aerobia:** el lodo de agua residual es agitado con una cantidad de oxígeno necesaria para mantener las condiciones aerobias, el tiempo medio de retención es de 40 días a 20°C y de 60 días a 15°C.
- **Digestión anaerobia:** realizada en ausencia de oxígeno con tiempo medio de retención de 15 días, entre 35°C - 55°C y 60 días a 20°C. En este proceso se propicia la degradación de la materia orgánica contenida en el en ausencia de oxígeno molecular; la materia orgánica contenida en la mezcla de lodos primarios y secundarios se convierte en metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂) principalmente. El proceso se lleva a cabo en un reactor completamente cerrado, los lodos se introducen en el reactor de forma continua o intermitente, y permanecen dentro de estos tanques durante períodos de tiempo considerables; el lodo estabilizado que se extrae del proceso

tiene un bajo contenido de materia orgánica y de microorganismos patógenos vivos. (Metcalf y Eddy, 1995).

Los dos tipos de digestores más empleados son los de alta y baja carga; en el proceso de digestión de baja carga, no se suele calentar ni mezclar el contenido del digestor, y los tiempos de retención varían entre 30 y 60 días. En los procesos de digestión de alta carga el contenido del digestor se calienta y mezcla completamente; el lodo se mezcla mediante recirculación de gas, mezcladores mecánicos, bombeo o mezcladores con tubos de aspiración, y se calienta para optimizar la velocidad de digestión, el tiempo de retención generalmente es menor a 15 días. La combinación de estos dos procesos se conoce como proceso de doble etapa, el primer tanque se utiliza para la digestión, y se equipa con dispositivos para el mezclado. El segundo tanque se utiliza para el almacenamiento y concentración del lodo digerido, y para la formación de un sobrenadante relativamente clarificado.

- **Tratamiento químico:** se adiciona cal al lodo para elevar el pH, la cal es el reactivo que más se utiliza por su reducido costo y alcalinidad, realiza principalmente una acción bactericida, llevando al bloqueo temporal de fermentaciones ácidas; la estabilización alcalina pretende aumentar el pH por encima de 12 unidades y mantenerlo durante 72 horas como mínimo, para lograr la reducción significativa de patógenos y la estabilización del lodo; adicionalmente, este valor de pH sobrepasa los límites de tolerancia para el crecimiento y supervivencia de organismos tan resistentes como los huevos de helmintos (EPA, 2003).

Los criterios de selección de la cal viva CaO o la cal hidratada $\text{Ca}(\text{OH})_2$ están en función también de aspectos específicos relacionados con el sitio de aplicación y aspectos técnicos y económicos; dentro de los primeros se encuentran la facilidad de adquisición, calidad del material, riesgos y requisitos de manipulación y dentro de los segundos están los costos de inversión inicial, operación y mantenimiento, costos del producto y costos asociados a su manipulación. El propósito principal de la estabilización alcalina es la reducción de patógenos a niveles por debajo del límite de la norma, que permitan su disposición segura o su uso en la agricultura sin restricciones. (Torres, 2008)

Los lodos generados por estos procesos, son clasificados según las condiciones especificadas por la norma EPA 40; la selección de alguno de estos procesos para la estabilización de un lodo en particular depende de varios factores tales como: la cantidad y calidad de lodos a tratar, las condiciones particulares del sitio y, la situación financiera en cada caso (Oropeza, 2006).

1.1.4 Factores limitantes en los lodos

- **La concentración de metales pesados**

Entre los metales pesados existentes, algunos son micronutrientes esenciales para las plantas como el Cu y el Zn, pero otros como Cd, Pb, Cr, Ni, Hg y Co, no lo son y pueden, a partir de una determinada concentración, resultar tóxicos para algún componente de la

cadena trófica suelo-planta-animal-hombre (Acosta *et al.*, 2003). Algunas de las características de los metales pesados resumidas por Martínez, (2003) se presentan en la Tabla 1-3.

Tabla 1-3: Características de los metales pesados

Metal	Características
Arsénico	Metaloides de amplia distribución, se emplea como conservador de la madera, en plaguicidas y en la fabricación de algunos medicamentos. En los cuerpos de agua se acumula en la cadena trófica, su ingestión, aun en dosis bajas, produce desórdenes gastrointestinales, afectación del tejido dérmico y alteraciones del sistema nervioso central.
Plomo	Elemento ampliamente distribuido en la naturaleza, las actividades humanas como la fabricación de pinturas, insecticidas, vidrios y baterías eléctricas, además como antidetonante de la gasolina, provocan emisiones peligrosas al ambiente. El plomo afecta a los microorganismos retardando la degradación de la materia orgánica. En los animales superiores afectan los glóbulos rojos, hígado y riñones, causando gran diversidad de padecimientos.
Níquel	Se utiliza como catalizador en la industria metalúrgica y en la fabricación de cerámica. Inhibe la actividad biológica de los microorganismos. En el hombre afecta el pulmón y produce
Zinc	Se usa en la metalúrgica como recubrimiento de otros metales; no es muy tóxico.
Cadmio	Subproducto de la explotación de otros metales como el cobre, zinc y plomo. Se utiliza en el electroplateado, fabricación de pinturas y plásticos y, en la fabricación de baterías. Su forma tóxica es el ion Cd^{2+} su acumulación afecta hígado y riñones.
Cobre	Elemento muy abundante en la naturaleza, es un micronutriente esencial, en dosis
Cromo	Se utiliza en la industria del cromado, fabricación de acero y curtido de pieles.
Mercurio	Es uno de los metales más peligrosos, se usa en la fabricación de componentes eléctricos y electrónicos en la industria del papel y en la agricultura. Su ingestión altera el sistema nervioso.
Selenio	Se considera un no metal. Normalmente se produce durante el refinamiento del cobre o la creación de ácido sulfúrico. A pesar de que es tóxico en grandes dosis, es un micronutriente esencial en el cuerpo.

Fuente: Martínez,(2003)

La concentración de metales pesados, de acuerdo con Hernández (1994), puede reducir la fermentación en los digestores, y la posibilidad de inutilizar los lodos para uso en agricultura; deben señalarse los siguientes efectos sobre la digestión

- La toxicidad de los metales pesados sobre las bacterias decrece en el siguiente orden: $Cr > Cu > Zn > Cd > Ni$

- Las concentraciones de metales pesados, reducen la producción de metano en un 10%, expresada en g/g de sólidos volátiles (S.V), son generalmente del siguiente orden: (Ver Tabla 1-4)

Tabla 1-4: Concentración característica de algunos metales pesados en lodos (g/g) de sólidos volátiles.

METAL	CONCENTRACIÓN
Cr	3.37×10^{-3}
Cu	13.48×10^{-3}
Zn	3.37×10^{-3}
Ni	7.27×10^{-3}
Cd	9.00×10^{-3}

Fuente: Hernández, (1994)

- La producción de gas disminuye el contenido de materia orgánica que permanece sin digerir, cuando la concentración de ácidos grasos volátiles y de sólidos volátiles aumenta en el licor mezcla del digestor. En la Tabla 1-5 se muestran concentraciones típicas de metales pesados que permiten procesos biológicos en el caso de lodos activados.

Tabla 1-5: Concentraciones críticas de metales que permiten procesos biológicos

LODOS ACTIVADOS	METALES			
	Cr	Cu	Ni	Zn
Concentración en continuo en agua	10	1	1-2.5	0.08-1.0
Dosis en agua residual	500	75	50<200	160

Fuente: Hernández, (1994)

Los metales pesados pueden llegar a ser potencialmente tóxicos para los animales y lo seres humanos, por lo que su concentración en los lodos no debe sobrepasar valores límites admisibles según la normatividades.

En la Tabla 1-6 se presentan las disposiciones existentes en Estados Unidos (EPA) sobre límites máximos de metales contaminantes en el compost a partir de Residuos Sólidos Urbanos; al igual que los límites en lo relacionado con contenidos de metales pesados para los compost a partir de residuos sólidos urbanos (RSU) de acuerdo al Decreto 822 de 1998 de la Comisión Reguladora de Agua Potable y Saneamiento Básico, por esta

razón, debe buscarse que los materiales orgánicos sean aprovechados de una manera segura y eficiente.

Tabla 1-6: Límites máximos de metales pesados

Metal	Tierras agrícolas y forestales, sitios públicos, recuperación de suelos*		Límites máximos permitidos en compost** (mg/kg - peso seco)
	Concentración máxima (mg/kg)	Aplicación máxima (kg/ha)	
Arsénico	75	41	54
Cadmio	85	39	18
Cromo	3000	3000	1200
Cobre	4300	1500	1200
Plomo	840	300	300
Mercurio	57	17	300
Molibdeno	75	18	20
Niquel	420	420	180
Selenio	100	100	14
Zinc	7000	2800	1800

Fuente: *Norma 503 EPA, ** Decreto 822/98 Ministerio de Desarrollo

La importancia de regular la concentración de metales en los biosólidos radica en la posibilidad de incrementar la disponibilidad de algunos de ellos que pueden causar problemas de fitotoxicidad o acumulación en los cultivos, sin embargo, el riesgo de lixiviación de metales a los acuíferos es poco probable siempre y cuando los biosólidos no contengan altas concentraciones de ellos. A pesar de esto, los registros de numerosos sitios con aplicaciones agrícolas de biosólidos demuestran que la asimilación de los metales por las plantas es mínima. Además, el incremento en la concentración de metales en el suelo no será significativo sino hasta después de diversas aplicaciones de biosólidos, (Jiménez *et al.*, 2001).

▪ La existencia de organismos patógenos

La información sobre la calidad microbiológica de los lodos es mínima o inexistente en gran parte de los países en vías de desarrollo y constituye el principal obstáculo en la disposición del lodo para tierra agrícola, sobre todo por el riesgo potencial que representan las enfermedades virales, bacterianas y parasitológicas de origen fecal, transmitidas a través del ciclo: hombre-lodo tierra-cultivo-hombre. (Ortiz, 2010)

Los huevos de helminto son el principal riesgo a la salud debido al reuso en la agricultura de agua residual o de lodos provenientes de los sistemas de tratamiento de agua residual (EPA, 2003). Menciona Ortiz, (2010), que los huevos de helminto se han

convertido en uno de los principales grupos indicadores de contaminación microbiológica en muestras de lodos y aguas residuales, ya que entre las características que permiten que a estos microorganismos se les considere como indicadores, se encuentran que sobreviven años, comparados contra virus y bacterias que lo hacen por meses y los protozoos que sobreviven semanas.

Entre los procesos que se emplean para una adecuada remoción de helmintos, las lagunas de estabilización ofrecen la mejor eficiencia, sonde bajo costo, debe ser operado adecuadamente, y es apropiado en poblaciones con pocos habitantes que dispongan de un área grande de terreno; además se pueden utilizar procesos de sedimentación combinados con la utilización de productos químicos, a los cuales se les debe efectuar pruebas para establecer su capacidad de remoción. (Jiménez, 2001)

Según las concentraciones de microorganismos patógenos, la norma EPA 40 CFR 503 limita las rutas de exposición de una comunidad a los patógenos presentes en los lodos.

En el lodo Clase A concentraciones de microorganismos son tan bajas que no genera riesgos en la salud pública, puede utilizarse en la agricultura sin ningún tipo de restricción. Para que un lodo adquiera las características de clase A debe someterse a tratamientos de desinfección, los cuales garantizan la reducción de las concentraciones de los microorganismos patógenos presentes en el material hasta niveles no infecciosos. Para esto, las concentraciones finales no deben sobrepasar las máximas admitidas por la EPA (ver Tabla 1-7).

Los biosólidos clase A pueden utilizarse sin restricciones de sitio de aplicación, por lo cual antes de su utilización, deben examinarse las concentraciones de coliformes fecales o *Salmonella*, ya que las bacterias pueden presentar recrecimiento, aun después de aplicados los tratamientos de desinfección. Esto no ocurre con los virus, ni con los parásitos, ya que estos microorganismos requieren de un huésped para llegar a su estado infeccioso. Las bacterias pueden reproducirse si las condiciones ambientales, como humedad y temperatura, lo permiten. Araque, (2006)

Tabla 1-7: Concentración máxima de microorganismos patógenos.

Parámetro	EPA 40 CFR 503
Coliformes fecales	< 1.0E+03 UFC/g Base Seca
Salmonella	< 3.0 NMP/4g Base Seca
Enterovirus	< 1 PFP/4g Base Seca
Huevos de helminto	< 1 huevo viable/4g Base Seca

Fuente: EPA*UFC: unidades formadoras de colonia, NMP: número más probable, PFP: partículas formadoras de placa

Los lodos Clase B son un material con mayor contenido patogénico y puede utilizarse pero con ciertas restricciones, contrario a los clase A, los cuales están libres de patógenos, los clase B pueden presentar concentraciones más altas de estos microorganismos, por lo cual la EPA reglamentó una serie de normas de manejo para este material cuando es aplicado sobre terrenos agrícolas y no agrícolas. Estos lodos deben ser monitoreados constantemente. En la clase B se analizan los coliformes fecales y su concentración debe ser menor de $2.0E+06$ UFC/g seco, no es necesario analizar los enterovirus, ni huevos de helminto. Araque, (2006)

1.1.5 Destino de los lodos

- Utilización en agricultura como abono (Digestión aerobia. Digestión anaerobia) Su aplicación está condicionada a la concentración de microorganismos patógenos, así como a la presencia de sustancias tóxicas y metales pesados.
- Recuperación de terrenos agotados (digestión aerobia y digestión anaerobia)
- Recuperación de energía eléctrica, mecánica y calorífica (incineración)
- Compostaje (sin digestión)
- Vertidos directamente al mar, ríos, lagos.
- Relleno de terrenos, escombreras, minas abandonadas, pantanos (Torres, 1997)

▪ Utilización Agrícola y forestal

Las plantas de tratamiento de aguas residuales producen sólidos, que corresponden a lodos que contienen gran cantidad de materia orgánica, microorganismos, macro y micro nutrientes, metales pesados y agua; se definen como acumulaciones de sólidos orgánicos sedimentables, separados en los distintos procesos de tratamiento de aguas y su incorporación en suelos, pretenden influir positivamente en éstos y a la vez buscar una salida adecuada a su acumulación sucesiva y progresiva en estas plantas. Una de las posibles vías de solución es la utilización de los lodos sanitarios, adicionados como lodos propiamente tal o formando parte del compost, ya que éstos tienen la capacidad de agregar nutrientes y materia orgánica a los suelos en donde se apliquen (Cuevas, 2006)

Para Builes, (2010) la materia orgánica de un suelo es el componente más global que contribuye significativamente a mantener su capacidad productiva; influye en características físicas tales como porosidad, estado de agregación de las partículas, densidad aparente, etc., y proporciona una reserva estable de nutrientes para las plantas y organismos en el medio edáfico, modificando ciertas propiedades químicas de éste durante su mineralización. Los suelos agrícolas y forestales sufren un desequilibrio en el mantenimiento de niveles estables de materia orgánica (MO) debido a diversas razones (excesivo laboreo, producción intensiva, uso de fitosanitarios, deforestaciones irracionales, incendios forestales, pastoreo inadecuado, etc.), ocasionando una disminución de la fertilidad natural. Como consecuencia de ello se presentan problemas ambientales tales como mayor erosión, poca infiltración y menor capacidad de almacenamiento de agua, dificultad para el desarrollo radical y deficiente establecimiento de poblaciones microbianas benéficas.

En general variados son los procesos en que interviene la materia orgánica, entre los que se mencionan ser fuente de energía para los procesos biológicos heterótrofos y fuente

primaria de nutrientes como N, P y S; aumenta la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y ayuda a la fijación de sustancias orgánicas e inorgánicas, además aumenta la capacidad de retención de agua, por nombrar algunas actividades edafológicas que la materia orgánica tiene (Castro, H 1998).

Se ha reportado que el uso de lodos como fuente de materia orgánica mejora las propiedades tanto físicas como químicas del suelo agrícola en cuanto a incrementos en los niveles de materia orgánica, disminución de la densidad aparente, mayor formación y estabilidad de agregados, mejor retención de humedad, incremento en el tamaño de poros, etc. Además aporta cantidades significativas de nitrógeno y fósforo que contribuye a disminuir el consumo de fertilizantes químicos. Los lodos han sido utilizados en silvicultura para incrementar la productividad forestal, para reforestar y para estabilizar áreas deforestadas o perturbadas por la minería, la construcción, los incendios, el sobrepastoreo, erosión u otros factores (Salcedo, 2007).

Junto a los beneficios del uso de los lodos, también debe considerarse los riesgos que representan estos materiales, ya que cada material es diferente y puede contener altas concentraciones de elementos potencialmente tóxicos (EPT) para los cultivos o para los consumidores de los productos de los mismos. La posibilidad de contaminar suelos y aguas subterráneas constituye su principal limitante, de ahí que su uso no puede ser indiscriminado sin una adecuada planeación y supervisión. Una utilización incorrecta de lodos puede ocasionar efectos indeseables sobre el suelo (Otero *et al.*, 1996).

▪ **Recuperación de suelos degradados y recuperación de paisajes**

En regiones sujetas a procesos de desertificación o pérdida de cobertura vegetal o suelos, derivados de causas naturales o antrópicas. Para recuperación de áreas que fueron sometidas a extracción minera o en aquellas sujetas a pérdida de suelos superficiales debido a obras de infraestructura (Builes, 2010).

Ortiz *et al.*, (2007) mencionan que los lodos pueden ser utilizados en tratamientos de biodegradación para mejorar suelos contaminados, a través de un proceso *ex situ*. En este caso, el suelo contaminado es excavado, tamizado para eliminar los elementos gruesos y mezclado con agua y otros aditivos en un biorreactor controlado. La mezcla del lodo resultante mantiene a los sólidos en suspensión y a los microorganismos biodegradadores en contacto con los contaminantes. En estos biorreactores se controlan parámetros que pueden limitar el crecimiento microbiano en la naturaleza como la disponibilidad de sustratos, nutrientes y oxígeno, la temperatura, el pH y la humedad. Según los autores, este sistema ha resultado satisfactorio para recuperar suelos contaminados con explosivos, hidrocarburos del petróleo, petroquímicos, solventes, pesticidas, etc., y se usan principalmente para tratar compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles no halogenados.

El Dr. Francisco Peinado, expresa que los lodos pueden ser utilizados dentro de las técnicas biológicas para la descontaminación de suelos, a través de procesos de mezcla de suelos contaminados con lodos, agua y aditivos, para favorecer la biodegradación al incrementar el contacto entre los microorganismos y el contaminante, dentro de un "biorreactor". Este método puede tener aplicabilidad para recuperar suelos que han sido

expuestos a la acción de explosivos o plaguicidas; también hace alusión a limitantes de estos procesos, asociadas a los suelos heterogéneos y arcillosos y a los costos de la actividad.

Hernández, (2004) menciona que los lodos residuales son utilizados para rehabilitar suelos muy degradados como los que se encuentran en áreas cercanas a minas. Son frecuentemente utilizados en bosques para mejorar las condiciones del suelo y elevar los niveles de nutrimentos en áreas erosionadas o como un sustrato inicial en reforestación de bosques. También son utilizados como base en la fabricación de compostas para uso en jardines públicos o privados y para la construcción en forma de ladrillos o adobes.

Alcañiz *et al*,(2008) indica que hasta el año 2005, se estima que se habían aplicado unas 50.000 toneladas de lodos residuales en la restauración de distintas actividades extractivas, lo que representa una pequeña parte de la producción en comparación con los lodos que se destinan anualmente a abonar suelos agrícolas. El uso de lodos en la restauración de espacios degradados, en comparación con el uso agrícola, se caracteriza por aportaciones relativamente altas, pero únicas, por unidad de superficie. Además, estas aplicaciones limitan la dispersión de contaminantes, ya que se aplican en áreas muy localizadas. Todo ello hace que la aplicación en la restauración de actividades extractivas se complemente bien con las aplicaciones agrícolas.

En España, dentro del marco del Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e innovación Tecnológica (2006), se planteó el Proyecto “Usos alternativos para lodos procedentes de la depuración de aguas residuales urbanas: biorecuperación de suelos contaminados con hidrocarburos en ambientes semiáridos” cuyo principal objetivo es abrir nuevos campos de usos para los lodos procedentes de la depuración de aguas residuales urbanas y de sus compost, mediante la *evaluación de la eficacia del empleo de estos materiales para estimular y acelerar los procesos de biorecuperación de suelos contaminados por efluentes procedentes de refinerías de petróleo, particularmente en clima semiárido*. Una vez descontaminados los suelos, se plantea la restauración de los mismos mediante la implantación de una cubierta vegetal estable que los proteja frente a la erosión y permita al mismo tiempo la integración paisajística de estas zonas “descontaminadas”. <http://www.biorrehid.cebas.csic.es/presentacion.html>

▪ Otros usos

Builes, (2010) menciona otras actividades que conllevan al aprovechamiento de los lodos residuales como construcción, utilización como material combustible para recuperación de energía, entre otros.

Fabricación de ladrillos: existen estudios sobre la valorización de lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales en la fabricación de ladrillos. La introducción de lodos en el proceso resulta muy atractiva porque determinados materiales cerámicos disponen de gran capacidad de inertización de metales pesados. Durante la cocción, los compuestos orgánicos del lodo: celulosa, lignina, grasas, microorganismos patógenos, etc. se destruyen y en su lugar se crean unos poros cerrados que darán lugar a sus propiedades de aislamiento térmico. Los componentes inorgánicos (arcillas, tierras, metales pesados, etc.), quedan insertados en la matriz vítrea del cuerpo cerámico y, por

tanto, inmovilizados. En general la introducción de lodos en matrices cerámicas tiene aspectos positivos energéticamente, pudiéndose apuntar los siguientes:

. Importante ahorro energético durante la cocción cerámica en función de la presencia de materia combustible en la matriz cerámica aportada por los lodos (en cualquier caso, el balance total energético debe tener en cuenta también el proceso de secado).

. Ahorro del consumo de agua por la aportación de los lodos (contienen un promedio del 70 % de humedad). Poder calorífico de los lodos, que aproximadamente se sitúa en las 3400 kcal/kg.

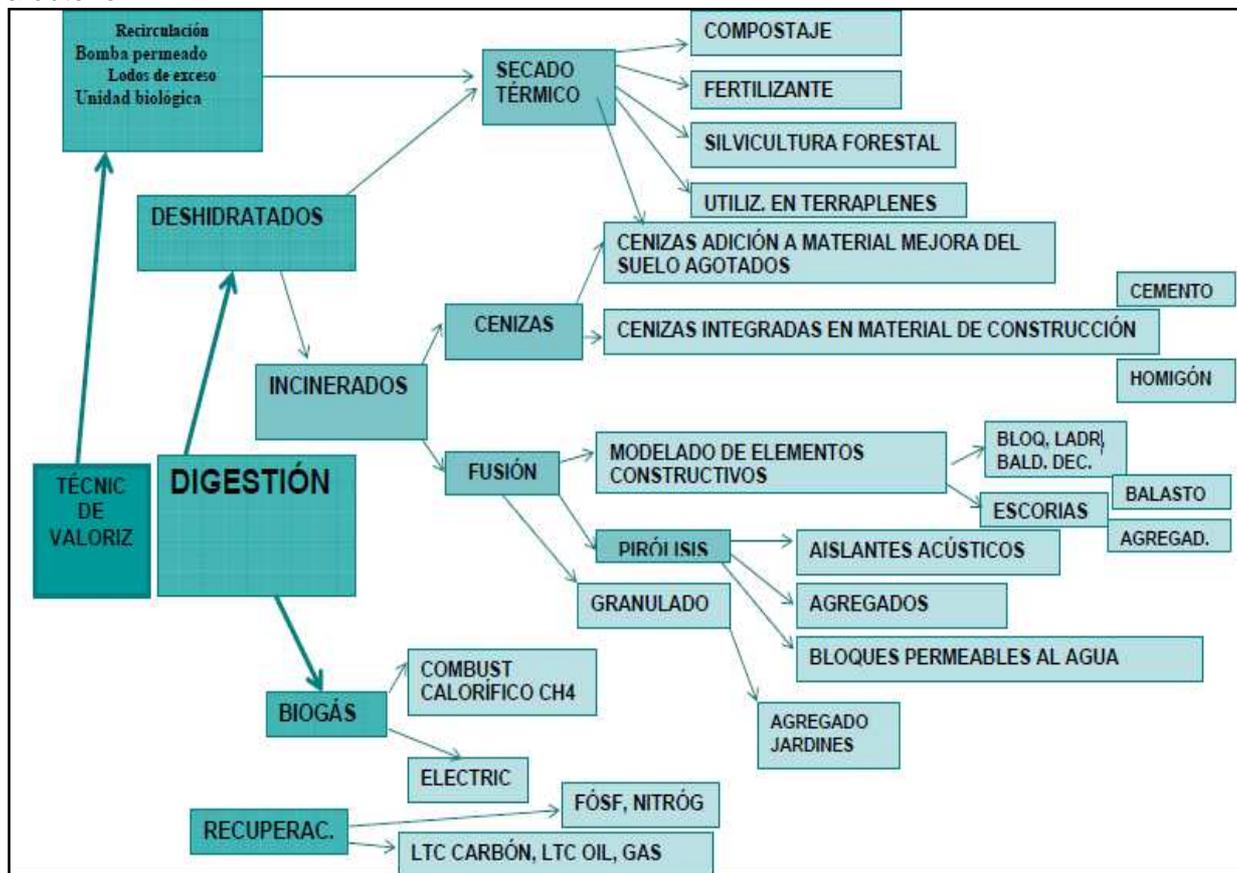
. El máximo porcentaje de lodos que se podría mezclar con la arcilla cerámica se sitúa en torno al 40 %, aunque con esta cantidad, la adherencia de la mezcla es pobre y la textura superficial del ladrillo irregular. Así, las proporciones óptimas están entre el 10 % y el 20 %.

Fabricación de hormigón: se han realizado estudios sobre la utilización de lodos secos de depuradora en el hormigón, siendo uno de ellos realizado en una planta de España. En dicho estudio se realizaron muestras de adoquines con un 2 % de lodo seco sobre peso de cemento y se determinaron las propiedades de dicho producto comparadas con el producto sin adición del lodo. El estudio concluyó que la adición de lodos de depuradoras al hormigón puede suponer una disminución de la porosidad y de absorción y un aumento de la resistencia mecánica, lo que lleva a que la utilización de los lodos en los adoquines aumente la durabilidad de estos últimos.

Utilización de cenizas: el hecho de adicionar ciertos porcentajes de cenizas producto de la incineración de lodos digeridos que varían entre un 5 y un 50 %, genera en los ladrillos ciertas propiedades variables que pueden afectar positivamente las cualidades de los mismos haciéndolos más porosos y menos densos favoreciendo sus cualidades como aislante térmico y acústico, pero por otro lado también afecta su resistencia al esfuerzo mecánico debido a una mayor porosidad se reduce su resistencia afectando negativamente las utilidades dichos ladrillos (Builes, 2010).

En general se puede decir que las técnicas de valorización o aprovechamiento de lodos se enfrentan a varios aspectos cruciales como son el tipo y características físico-químicas de los mismos, para poder ser utilizados en el fin escogido. Además de tomar en cuenta los condicionantes del volumen a tratar y la viabilidad de la técnica que se desea emplear. Pues no será interesante una aplicación para lodos que no pueda asumir un volumen considerado de los mismos, genere desechos de mayor perjuicio que los lodos eliminados o conlleve una inversión no rentabilizada por alguno de los aspectos sanitarios, medioambientales o de sostenibilidad. Tal como se observa en la Figura 1-1a medida que se realizan procesos de adecuación al lodo, permite ser aplicado a un mayor número de aplicaciones o servicios. Siendo esto muy positivo siempre que sea rentable para algún aspecto sanitario, medioambiental o de sostenibilidad. <http://es.scribd.com/doc/125643552/41-ESTUDIO-DE-LODOS-DE-DEPURADORA-1-pdf>

Figura 1-1: Etapas de la estructura de valorización de los lodos, procesos y productos a obtener



Fuente: <http://es.scribd.com/doc/125643552/41-ESTUDIO-DE-LODOS-DE-DEPURADORA-1-pdf>

1.2 Biosólidos

Son un producto originado después de un proceso de estabilización de lodos orgánicos provenientes del tratamiento de las aguas residuales; Fuccz et al. (2007), mencionan que los biosólidos generados por estabilización biológica o química de lodos residuales son ricos en materia orgánica, nitrógeno y fósforo lo cual los hace potencialmente útiles como enmiendas orgánicas, además, pueden mejorar las propiedades físicas del suelo como la densidad aparente, estructura, porosidad y retención de agua, lo cual puede reflejarse en un incremento en el rendimiento de cultivos o en la restauración de la capa vegetal. Esta alternativa es doblemente satisfactoria por un lado el aspecto ambiental se beneficia al eliminarse los residuos orgánicos urbanos sin alteración relevante del equilibrio ecológico y por el otro, el aspecto agrícola al incorporar a los suelos la materia orgánica y los nutrientes contenidos en este material.

Estos biosólidos por su alto contenido de nutrientes y materia orgánica los proveen al suelo nitrógeno y fósforo, así como cantidades trazas de micronutrientes (Ni, Zn, Cu, Mg, entre otros), su reutilización en agricultura es valiosa no sólo porque representa un costo

razonable, sino también, porque mejora la fertilidad del suelo y reduce la necesidad de fertilizantes inorgánicos, optimizando así, la calidad de las cosechas. Sin embargo, su aplicación está condicionada al riesgo relacionado con los microorganismos patógenos presentes en este producto, así como a la presencia de sustancias tóxicas y metales pesados (Guzmán, y Campos, 2004).

Las actividades de disposición en el suelo, son una alternativa de preferencia para instalaciones pequeñas al ofrecer ventajas económicas y beneficios al medio ambiente y a las comunidades agrícolas. (Alcañiz, y Ortiz, 1998). Las ventajas del uso del biosólido en comparación con los fertilizantes convencionales son las siguientes:

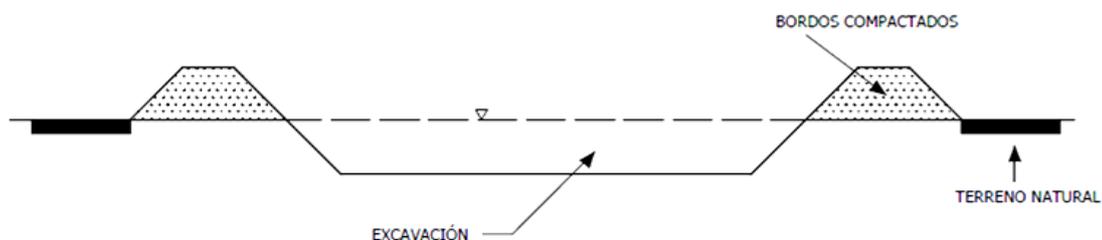
- Son productos reciclados cuyo contenido de nutrientes no son tan solubles como en los fertilizantes químicos, y por lo tanto, se liberan más lentamente.
- Su aplicación requiere prácticas más rigurosas para la conservación y el control de la erosión del suelo, y el manejo de los nutrientes, en el caso de los agricultores que utilizan fertilizantes químicos o estiércol.
- La materia orgánica en los biosólidos mejora las características del terreno para el crecimiento óptimo de las plantas, la fertilidad y la capacidad de retención de agua.
- Una declaración conjunta del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, la Administración de Alimentos y Fármacos, y la Agencia de Protección Ambiental manifiesta que: "...la aplicación de los biosólidos de alta calidad junto con los procedimientos de manejo adecuados, debe salvaguardar al consumidor de cosechas contaminadas y reducir al mínimo cualquier posible efecto adverso en el ambiente" (EPA, 1995).

1.3 Lagunas de estabilización

Excavación en el suelo donde el agua residual se almacena para su tratamiento por medio de la actividad bacteriana con acciones simbióticas de las algas y otros organismos.

Las lagunas se construyen generalmente por excavación del terreno natural, formando un bordo perimetral con el fin de encerrar el área de tratamiento, evitar la aportación de escurrimientos superficiales y, en ocasiones, aumentar la capacidad de almacenamiento (Figura 1-2). Con frecuencia, se sobreexcava a mayor profundidad que la requerida por el proyecto ya que los depósitos naturales de suelo normalmente no tienen las características adecuadas para un desplante directo, y se debe sustituir el material sobreexcavado por uno de relleno seleccionado y bien compactado. La profundidad de la laguna deberá encontrarse entre 1,5 a 2,5 m, en el caso de una laguna primaria se deberá tener en cuenta una profundidad adicional para la acumulación de los lodos entre periodos de limpieza de 5 a 10 años. Martínez (2003).

Figura 1-2: Sección transversal típica de una laguna construida por excavación y formación de bordos



Fuente: Martínez, (2003)

La selección del sitio para la construcción de una laguna debe tomar en cuenta:

- La capacidad de tratamiento y de almacenamiento requerida.
- La necesidad de elevación (presión).
- La disponibilidad y costo del terreno.
- Un factor determinante en la localización de las lagunas es la disponibilidad de terreno
- Información geotécnica preliminar.
- Topografía y geología.
- Estudios de impacto ambiental

Aun cuando la forma superficial de la laguna puede ser cualquiera, lo común es que sea de una geometría simple (rectangular o cuadrada) con las esquinas redondeadas para permitir el uso de maquinaria pesada y facilitar la construcción. Lo ideal es que la relación ancho/largo de la laguna sea lo mayor posible para asegurar que el funcionamiento hidráulico corresponda a un régimen de flujo tipo pistón o "j" reactores en serie, además de evitar los cortos circuitos o las zonas muertas. La forma rectangular con una relación de 3:1 (3 metros de largo por 1 metro de ancho) es la más común, debido a la dificultad que existe para construir una laguna muy larga. Las lagunas se deben construir con su mayor dimensión paralela a la dirección del viento predominante, de tal forma que se aproveche el mezclado (Martínez, 2003).

Para evitar la contaminación de acuíferos se debe evitar que el agua se infiltre al subsuelo, por lo cual es necesario seleccionar el sitio buscando que tenga un suelo de preferencia arcilloso, evitar áreas con fallas geológicas y lechos de río debido a los riesgos de infiltración. Las técnicas para impermeabilización son tres:

- Suelos naturales (arcillas compactadas).
- Suelos locales mejorados con estabilizantes químicos
- Revestimientos sintéticos (geomembranas o liners).

La operación y mantenimiento de las lagunas son acciones relativamente sencillas que se deben realizar para producir un buen efluente. Como cualquier proceso biológico, ninguna laguna funciona en el momento de su arranque con la eficiencia de diseño, se requiere un periodo de aclimatación que depende de la temperatura, características del agua residual y, sobre todo, del buen desarrollo de la población biológica, entre otros factores. Este proceso puede llevar de semanas a meses, y la habilidad del operador

consiste en tratar de reducirlo al mínimo. También debe establecerse un equilibrio hidráulico, dependiendo del gasto, la permeabilidad del fondo, la evaporación, entre otros. Las lagunas de estabilización se pueden usar casi en cualquier parte, variando la velocidad a que pueden operarse, con la temperatura, la energía luminosa y otras condiciones locales (Martínez, 2003).

De acuerdo con Martínez, (2007) cuando el agua residual es descargada en una laguna de estabilización se realiza en forma espontánea un proceso de autopurificación o estabilización natural, en el que tienen lugar fenómenos de tipo físico, químico y biológico. En esta simple descripción se establecen los aspectos fundamentales del proceso de tratamiento del agua que se lleva a cabo en las lagunas de estabilización:

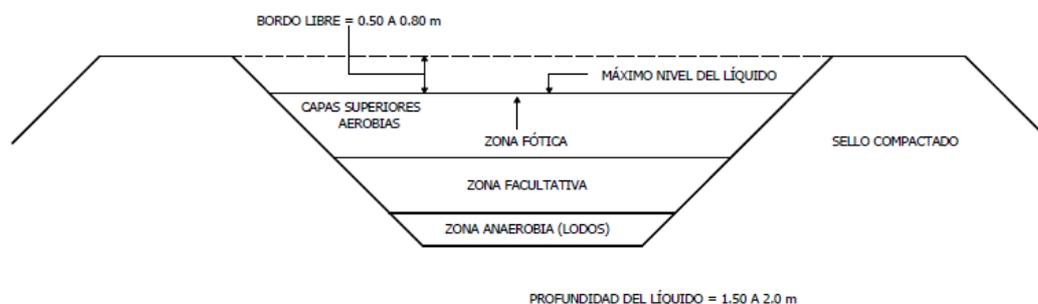
- Es un proceso natural de autodepuración
- La estabilización de materia orgánica se realiza mediante la acción simbiótica de bacterias, algas, y otros organismos superiores.
- Se presentan, procesos físicos de remoción de materia suspendida.
- Se efectúan cambios químicos en la calidad del agua que, entre otros aspectos, mantienen las condiciones adecuadas para que los organismos puedan realizar la estabilización, transformación, y remoción de contaminantes orgánicos biodegradables y, en algunos casos, nutrientes.
- Se establecen cadenas tróficas y redes de competencia que permiten la eliminación de gran cantidad de microorganismos patógenos que se encuentran presentes en las aguas, residuales. Por lo tanto, las lagunas de estabilización se consideran y se pueden proyectarse como un método de tratamiento de la materia orgánica y de remoción de los patógenos presentes en el agua residual.

Dependiendo, de las condiciones del problema por resolver las lagunas de estabilización pueden utilizarse solas, combinadas con otros procesos de tratamiento biológico, o bien, entre ellas mismas (sistemas lagunares de tratamiento), (Martínez, 2007).

1.3.1 Lagunas facultativas

De acuerdo con Martínez, (2003) las lagunas facultativas son las más utilizadas en el tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales, y que se les denomina lagunas de oxidación de agua residual doméstica o laguna fotosintéticas. El tiempo de retención hidráulica varía de 5 a 30 días y la profundidad de 1.5 a 2 m, dependiendo de su localización geográfica, clima y del volumen requerido para almacenar el lodo sedimentado. Se recomienda mantener un bordo libre de 0.5 a 0.8 m para minimizar los efectos del viento y el oleaje así como absorber temporalmente sobrecargas hidráulicas.

Figura 1-3: Laguna facultativa



Fuente: Martínez, (2003)

Las lagunas facultativas poseen una zona aerobia y una anaerobia, siendo respectivamente en superficie y fondo. La finalidad de estas lagunas es la estabilización de la materia orgánica en un medio oxigenado proporcionando principalmente por las algas presentes (Figura 1-3). Las características principales de este tipo de lagunas son el comensalismo entre las algas y bacterias en el estrato superior y la descomposición anaerobia de los sólidos sedimentados en el fondo. El objetivo de las lagunas facultativas es obtener un efluente de la mayor calidad posible, en el que se haya alcanzado una elevada estabilización de la materia orgánica, y una reducción en el contenido en nutrientes y bacterias coliformes. (Olivos, 2010)

En una laguna facultativa existen tres zonas:

- Zona superficial en la que existen bacterias aerobias y algas en una relación simbiótica, como se ha descrito anteriormente.
- Zona inferior anaerobia en la que se descomponen activamente los sólidos acumulados por acción de las bacterias anaerobias.
- Zona intermedia, que es parcialmente aerobia y anaerobia, en la que la descomposición de los residuos orgánicos la llevan a cabo las bacterias facultativas. Los sólidos de gran tamaño se sedimentan para formar una capa de fango anaerobio. Los materiales orgánicos sólidos y coloidales se oxidan por la acción de las bacterias aerobias y facultativas empleando el oxígeno generado por las algas presentes cerca de la superficie. El dióxido de carbono, que se produce en el proceso de oxidación orgánica, sirve como fuente de carbono por las algas. La descomposición anaerobia de los sólidos de la capa de fango implica la producción de compuestos orgánicos disueltos y de gases tales como el CO_2 , H_2S y CH_4 , que se oxidan por las bacterias aerobias, o se liberan a la atmósfera. (Olivos, 2010)

1.3.2 Tanque Imhoff

El tanque Imhoff es una unidad de tratamiento primario cuya finalidad es la remoción de sólidos suspendidos; para comunidades de 5000 habitantes o menos, ofrece ventajas para el tratamiento de aguas residuales domésticas, ya que integran la sedimentación del agua y la digestión de los lodos sedimentados en la misma unidad, por ese motivo también se llama tanques de doble cámara. Los tanques Imhoff tienen una operación

muy simple y no requiere de partes mecánicas, sin embargo, para su uso concreto es necesario que las aguas residuales pasen por los procesos de tratamiento preliminar de cribado y de remoción de arenas.

El tanque Imhoff típico (Figura 1-4) es de forma rectangular y se divide en tres compartimientos:

- Cámara de sedimentación.
- Cámara de digestión de lodos.
- Área de ventilación y acumulación de natas.

Durante la operación, las aguas residuales fluyen a través de la cámara de sedimentación, donde se remueven gran parte de los sólidos sedimentables, estos resbalan por las paredes inclinadas del fondo de la cámara de sedimentación pasando a la cámara de digestión a través de la ranura con traslape existente en el fondo del sedimentador. El traslape tiene la función de impedir que los gases o partículas suspendidas de sólidos, producto de la digestión, que inevitablemente se producen en el proceso de digestión, son desviados hacia la cámara de natas o área de ventilación. Los lodos acumulados en el digestor se extraen periódicamente y se conduce a lechos de secado, en donde el contenido de humedad se reduce por infiltración, después de lo cual se retiran y se disponen de ellos enterrándolos o pueden ser utilizados para mejoramiento de los suelos. (Olivos, 2010)

Ventajas

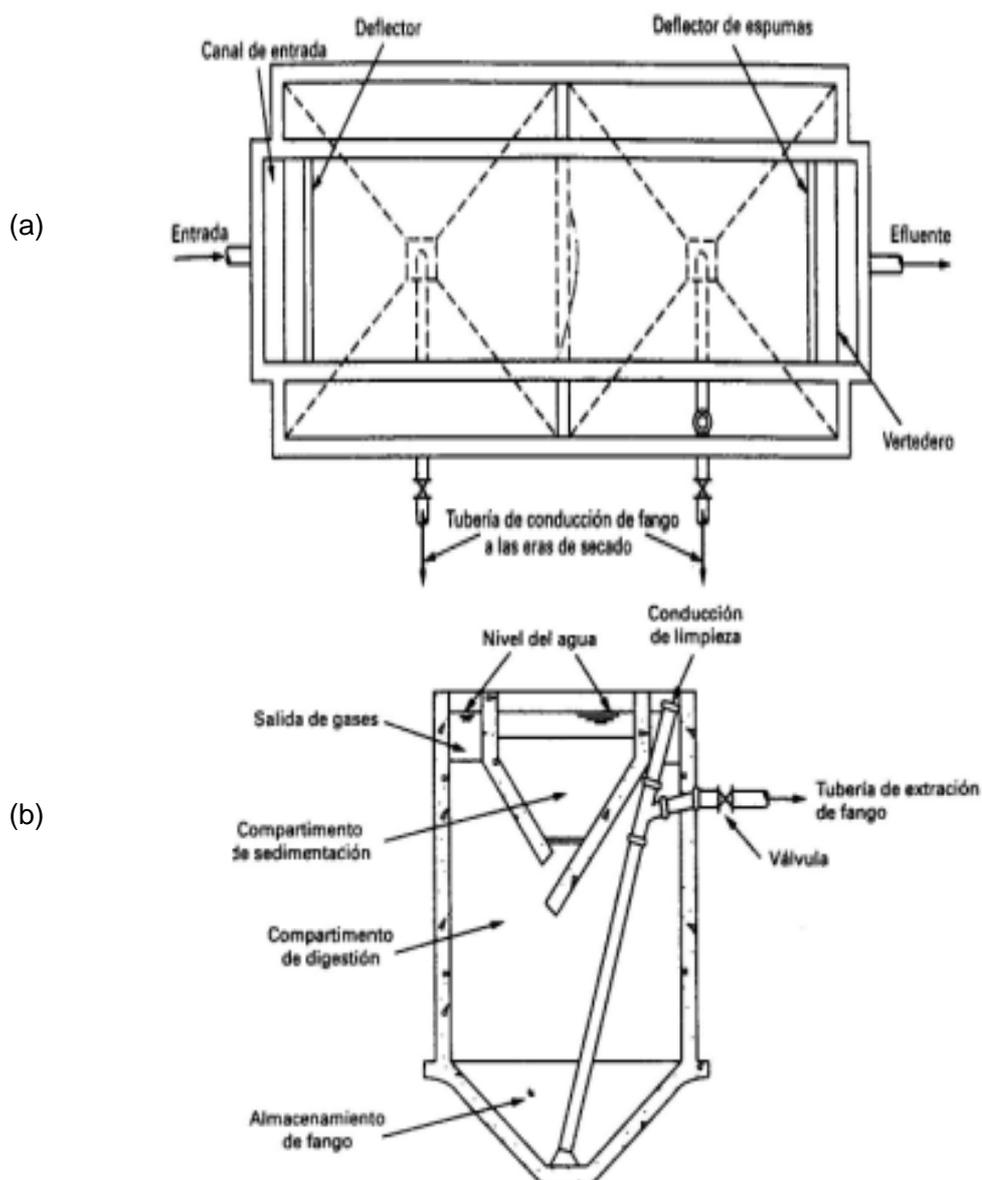
- Contribuye a la digestión del lodo, mejor que un tanque séptico, produciendo un líquido residual de mejores características.
- No descargan lodo en el líquido efluente.
- El lodo se seca y se evacua con más facilidad que el procedente de los tanques sépticos, esto se debe a que contiene de 90 a 95% de humedad.
- Las aguas servidas que se introducen en los tanques Imhoff, no necesitan tratamiento preliminar, salvo el paso por una criba gruesa y la separación de las arenas.
- El tiempo de retención de estas unidades es menor en comparación con las lagunas.
- Tiene un bajo costo de construcción y operación.
- Para su construcción se necesita poco terreno en comparación con las lagunas de estabilización.
- Son adecuados para ciudades pequeñas y para comunidades donde no se necesite una atención constante y cuidadosa, y el efluente satisfaga ciertos requisitos para evitar la contaminación de las corrientes

Desventajas

- Son estructuras profundas. (> 6m).
- Es difícil su construcción en arena fluida o en roca y deben tomarse precauciones cuando el nivel freático sea alto, para evitar que el tanque pueda flotar o ser desplazado cuando este vacío.
- El efluente que sale del tanque es de mala calidad orgánica y microbiológica.
- En ocasiones puede causar malos olores, aun cuando su funcionamiento sea correcto.

El tanque Imhoff elimina del 40 al 50% de sólidos suspendidos y reduce el DBO en un 25 a 35%. Los lodos acumulados en el digestor del tanque Imhoff se extraen periódicamente y se conducen a lechos secados. Debido a esta baja remoción de DBO y coliformes, lo que se recomendaría es enviar el efluente hacia una laguna facultativa para que haya una buena remoción de microorganismos en el efluente. (Olivos, 2010)

Figura 1-4: Tanque Imhoff típico para pequeñas comunidades: (a) planta y (b) sección.



Fuente: <http://www.monografias.com/trabajos81/disenio-tratamiento-primario/disenio-tratamiento-primario2.shtml>

2. Antecedentes

El valor de los desechos sólidos de origen humano y animal ha sido reconocido por muchos años. Los excrementos provenientes de letrinas han sido usados como fertilizantes y mejoradores de las propiedades físicas del suelo por siglos, en los países asiáticos. En algunas ciudades europeas existían fincas donde se habían utilizado estos lodos por décadas, por ejemplo en Edimburgo, Escocia, lo usaban desde la mitad del siglo XVII; también su uso fue extensivo y exitoso en Berlín y París por los años 1850. (Acosta, 1995)

En España y el resto de Europa se han utilizado con fines agrícolas y se tiene experiencia en relación a su naturaleza, formas de aplicación, dosis y efectos sobre el suelo, agua y salud humana. En los Estados Unidos, las aguas residuales han sido usadas para el riego de cultivos desde el siglo XIX. Sin embargo, aun cuando los lodos residuales han sido aplicados al suelo por muchos años, esta práctica no ha sido ampliamente reconocida. Hoy en día, en los países industrializados, la disposición de los lodos residuales provenientes de las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales e industriales, está asociado con el objetivo primordial, de interés nacional, de mejorar la calidad ambiental. Sin embargo, la disposición se ha convertido en un problema difícil y costoso para los organismos encargados del control de calidad ambiental. Es por esto que la aplicación de los lodos residuales al suelo ha sido vista como una alternativa que puede proporcionarnos un método, ambientalmente aceptable, para manejar estos productos de desecho (Soárez, 2002).

En Colombia se enfrenta en estos momentos la mayor emergencia sanitaria de toda su historia, sus principales ríos y corrientes subterráneas están siendo contaminados a cada momento por el vertimiento indiscriminado de todo tipo de aguas residuales tanto de origen industrial como doméstico y no se conocen muchas experiencias en el manejo y disposición de lodos producidos por plantas de tratamiento de aguas residuales de origen doméstico y aún se sabe muy poco sobre su aplicación en el suelo con fines agrícolas. Se reportan trabajos de investigación realizados por Universidades como la Javeriana que ha dedicado su investigación a la caracterización biológica de los lodos residuales, la universidad del Valle ha hecho trabajos de investigación en aplicación agrícola de lodos residuales compostados.

En Boyacá, de acuerdo con el estudio realizado por Cepeda (2006), se podrían utilizar en cultivos agrícolas y pastizales por su bajo contenido de metales pesados, pero debido al

contenido de patógenos se deben atender las restricciones de emplazamiento enunciadas anteriormente. La utilización de los lodos en cultivos hortícolas comerciales debe obedecer a pruebas agronómicas a nivel de campo, donde se establezcan las proporciones adecuadas de aplicación y sus efectos en los cultivos a nivel fisiológico y productivo.

Colin, (1994) presenta algunas nuevas aplicaciones a partir de los lodos residuales, tales como; material de adsorción, medio de cultivo para la producción de ácido giberélico, materia prima para grasa grafitada, puntillas para lápices, entre otros, se desarrollan diversos métodos para cada aplicación del producto obtenido de los lodos residuales, por ejemplo; material de adsorción, nucleador en la formación de flóculos, medio de cultivo para la producción de ácido giberélico, materia prima para grasa de calzado, grasa grafitada, puntillas para lápices. Las principales prácticas para la disposición de lodos que se han llevado a cabo con mayor frecuencia pueden agruparse en: procesos térmicos, relleno de terrenos y aplicación a suelo.

En cuanto a los procesos térmicos y la incineración en particular, requieren de una evaluación de los costos y de asegurar una disposición segura o el uso del subproducto resultante. La ventaja principal que muestra el proceso térmico es la disminución de volumen de lodos residuales; sin embargo, estas técnicas no son bien aceptadas por la opinión pública como una práctica segura por las emisiones a la atmósfera. El mejoramiento de técnicas que disminuyan la emisión de otros contaminantes y la difusión de esta información, podrían mejorar el panorama ante este tipo de prácticas. (Colin, 1994)

El relleno de terrenos es conveniente con lodos residuales donde el espacio es suficiente y la cantidad depositada es razonable, o bien, puede utilizarse como un material de cobertura mezclándose con otros elementos para mejorar su estructura y consistencia como en el caso del cemento. Esto representa una alternativa viable cuando la cantidad de metales pesados no representa un riesgo (Colin, 1994).

La aplicación en suelo se contempla como la mejor opción para el futuro, particularmente para plantas de tratamiento pequeñas, que trabajan con aguas menos contaminadas con metales pesados, colorantes, microorganismos patógenos etc. y tienen sitios de disposición cercanos. Sin embargo el uso agrícola está sujeto a la variabilidad en el tiempo de siembra y el tipo de cultivo, así como a las condiciones climáticas. (Colin, 1994).

Grajales *et al* (2006) en su trabajo para la Universidad Tecnológica de Pereira menciona que dentro de las opciones disponibles para la disposición final de los lodos tratados, su uso como mejorador de suelos es el más eficiente, dado que este residuo encierra en su composición materia orgánica, macro y micro nutrientes, que hacen que su contribución en el suelo sea de suma importancia en lo que respecta al ahorro de recursos en la compra de fertilizantes, además de proporcionar una mejora en las características físicas, químicas y biológicas del suelo que lo recibe lo que se traduce en bajos costos de disposición final e impactos positivos al ambiente por el reciclaje de nutrientes en el suelo.

Las regulaciones sobre biosólidos en el mundo tienen varias consideraciones, por ejemplo, establecen límites y parámetros en las concentraciones de metales pesados; en EEUU y la Unión Europea existen normativas muy similares al respecto, las cuales han sido imitadas en muchos otros países. La mayoría de normatividades regulan los mismos indicadores de contaminación fecal (coliformes fecales y huevos de helminto), y establecen la necesidad de tratamiento de los lodos (digestión anaeróbica, aeróbica, secado térmico, estabilización química, etc.) para que al ser convertidos en biosólidos puedan ser aplicados al suelo (Dágner, 2003).

De acuerdo a Builes, (2010) en Colombia existe poca información acerca del manejo de los lodos, en el contexto nacional solo se cuenta con los Títulos C, E, I del Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS del Ministerio de Desarrollo Económico el cual define los lodos de la siguiente manera:

- Lodo: Contenido de sólidos en suspensión o disolución que contiene el agua y que se remueve durante los procesos de tratamiento.

De igual manera el Decreto 1594 de 1984 (Ministerio de Desarrollo Económico), correspondiente a los usos de las aguas y los residuos líquidos se tiene que:

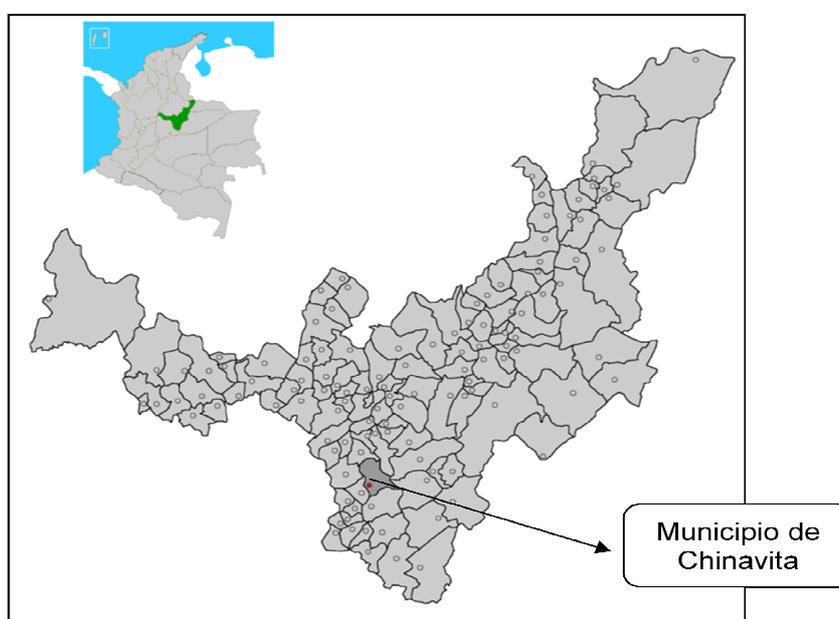
- Artículo 70: Los sedimentos, lodos y sustancias sólidos provenientes de sistemas de tratamiento de agua o equipos de control de contaminación ambiental, y otras tales como cenizas, cachaza y bagazo, no podrán disponerse en cuerpos de aguas superficiales, subterráneas, marinas, estuarinas o sistemas de alcantarillado, y para su disposición deberá cumplirse con las normas legales en materia de residuos sólidos.

3. Metodología

3.1 Área de estudio

El municipio de Chinavita, con una población de 3143 habitantes, de los cuales 1118 se encuentran en la cabecera municipal y 2025 en la zona rural, hace parte de la Provincia de Neira, en el departamento de Boyacá, localizado en el Centro Oriente de la República de Colombia (Figura 3-1). Ocupa una extensión de 148.18 Km², incluyendo la cabecera municipal y limita por el norte con Tibaná y Ramiriquí, por el oriente con Ramiriquí y Miraflores, por el sur con Garagoa y por el occidente con Pachavita y Úmbita; ubicado en la parte sur del departamento y limita con el departamento de Casanare. <http://chinavita-boyaca.gov.co/index.shtml>

Figura 3-1: Localización del municipio de Chinavita (Boyacá)



Fuente: Autor

La altitud de la cabecera municipal es de 1763 metros sobre el nivel del mar, con una temperatura media de 20° C y una distancia de 67 Km a Tunja, la capital del

departamento. Respecto a la precipitación, se presentan diferencias ocasionadas por la variación en la altitud, desde 1600 msnm., sobre el nivel del río Garagoa con una precipitación media anual de 1855 mm y 1586 mm en el sector del cerro de Mama Pacha hasta 3.600 msnm.<http://chinavita-boyaca.gov.co/index.shtml>

Los habitantes se dedican especialmente a la agricultura, cultivan papa, caña de azúcar, tomate, hortalizas, plátano, café, frutas y fique; para estas labores se usan métodos rudimentarios como el arado de chuzo y bueyes, muy poco usan técnicas avanzadas o modernas. En la ganadería predomina el ganado vacuno, también hay ganado porcino, caprino, caballar, lanar y aves de corral; en cuanto a minería en la parte rural se encuentran yacimientos de carbón, arena y roca.

La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales PTAR, se encuentra localizada en la parte Occidental del municipio, aproximadamente a 100 m del casco urbano y cuenta con un sistema de tratamiento de aguas residuales que corresponde a Lagunas de Oxidación (Laguna Facultativa) (Figura 3-2), la cual se encuentra en funcionamiento desde el año 2009.

Figura 3-2: Laguna de Oxidación de la PTAR en el municipio de Chinavita



Fuente: Autor

Descripción de la planta de tratamiento: el sistema corresponde a estructuras muy simples en las que se llevan a cabo procesos de depuración natural altamente eficientes y muy complejos.

- Caudal de diseño: 5 Litros/segundo

La planta de tratamiento de aguas residuales PTAR consta de:

- **Sistema de quietamiento:** recibe el agua y su función es estabilizar el flujo del agua de tal manera que permita una entrada moderada al sistema de tratamiento.
- **Rebosadero de excesos:** se utiliza para contrarrestar un posible desbordamiento en caso de un exceso de caudal anormal. (Figura 3-3 (b)).

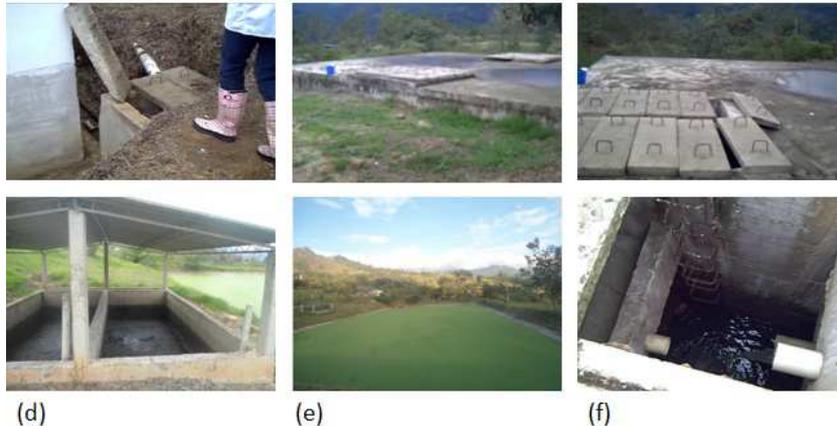
- **Canal de entrada con rejillas:** se utilizan para retener sólidos gruesos y proteger las tuberías y otros elementos (Figura 3-3 (b y c)).
- **Trampa de grasas:** medio para remoción del material graso de las aguas residuales. (Figura 3-3 (d y e)).
- **Canaleta Parshall:** permite medir la cantidad de agua que entra a la planta de tratamiento; para aforo de caudal. (Figura 3-3 (f)).
- **Tanques Imhoff en paralelo:** permiten un tratamiento primario, mediante la eliminación de la materia orgánica particulada sedimentable y de los flotantes (Figura 3-4 (b y c)).
- **Lecho de secado:** elimina una cantidad de agua suficiente de los lodos para el que el resto pueda manejarse como material sólido (Figura 3-4 (d)).
- **Lagunas facultativas:** poseen una zona aerobia y una anaerobia, siendo respectivamente en superficie y fondo cuya finalidad es la estabilización de la materia orgánica en un medio oxigenado proporcionando principalmente por las algas presentes. (Figura 3-3 (e)).
- **Estructura de descarga:** descargan el agua tratada que cumple con los parámetros de calidad (Figura 3-4 (f)).

Figura 3-3: Estructuras de la PTAR Chinavita (a) Rebosadero de excesos, (b) y (c) Canal de entrada con rejillas, (d) y (e) Trampa de grasas, (f) Canaleta Parshall



Fuente: Autor

Figura 3-4: Estructuras de la PTAR Chinavita (a) Tubería de conducción, (b) y (c) Tanques Imhoff, (d) Lecho de secado, (e) Lagunafacultativa, (f) Estructura de descarga



Fuente: Autor

3.2 Caracterización de los lodos de la PTAR del municipio de Chinavita

Con el fin de tener un criterio sobre el tipo de lodos que se generan en la planta de tratamiento de aguas residuales PTAR del municipio de Chinavita y a la vez determinar las posibilidades de manejo de estos residuos, se realizó un muestreo de lodos (Figura 3-5) y la determinación de sus características mediante análisis de parámetros agronómicos, contenido de metales pesados y análisis microbiológico (Coliformes totales, Coliformes fecales, *Salmonella* y huevos de Helmintos)

Figura 3-5: Muestreo de lodos para análisis de laboratorio



Fuente: Autor

3.2.1 Procedimientos de muestreo

Se tomaron las muestras en el lecho de lodos de la PTAR del municipio de Chinavita, teniendo en cuenta los protocolos entregados por cada laboratorio.

- **Muestreo para Análisis agronómico:**

Materiales: Balde, pala de jardinería, bolsas plásticas de cierre hermético

Manejo de la muestra: eliminación de la humedad de la muestra

Cantidad procesada de la muestra: 0.5 kilogramos.

La muestra se toma en el lecho de secado y se mantiene al aire libre para eliminar el exceso de humedad, una vez sin humedad se prepara la muestra, se empaca en bolsa plástica de cierre hermético, se rotula y se envía al laboratorio para análisis.

- **Muestreo para contenido de metales pesados**

Materiales: Balde, pala de jardinería, bolsas de cierre hermético

Volumen procesado muestra: 800gramos

Las muestras se toman en el lecho de secado, se envían en bolsas plástica de cierre hermético, se rotulan y se envían al laboratorio para análisis.

- **Muestreo para análisis microbiológico**

Materiales:

- . Recipiente plástico previamente esterilizado con capacidad de 8 litros (entregados por el laboratorio)

- . Recipiente de vidrio previamente esterilizado con capacidad de 700ml (entregados por el laboratorio)

Las muestras se toman en el lecho de secado, para huevos de Helminthos se utiliza el recipiente plástico y con ayuda de un embudo se llena el envase; la muestra para bacterias se toma en el envase de vidrio de tal manera que sea en forma rápida (Figura 3-6), las muestras fueron adecuadamente preservadas en frío y enviadas al laboratorio para su análisis correspondiente.

- **Análisis de Coliformes totales, fecalesy *Salmonella sp.***

Metodología empleada; Métodos estándar para de Análisis de Aguas y Aguas Residuales (Standard Methods for de Examination of Water and Wastewater.)18th edición. Asociación Americana de Salud Pública (APHA).1992

Volumen procesado muestra: 100 ml

- . **Análisis para determinar huevos de Helminthos:** volumen procesado de la muestra 5000 ml; Metodología empleada: Norma Mexicana NMX-AA-1133-CFI-1990

Volumen procesado muestra: 100 ml

Figura 3-6: Muestras de lodos para envío a laboratorio

Fuente: Autor

3.2.2 Parámetros a analizar

- **Parámetros agronómicos:** los parámetros a analizar en el Laboratorio de Suelos y Aguas de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia de Tunja, se presentan en la Tabla 3-1

Tabla 3-1: Parámetros agronómicos a analizar en el Laboratorio Suelos y Aguas UPTC

PARÁMETROS	UNIDAD	MÉTODO ANALÍTICOS (CALS – ICONTEC)
pH		Potenciómetro relación suelo agua 1:1
Materia orgánica	%	Walkey - Black
Fósforo disponible	ppm	Bray II - colorimetría
Ca-Mg-K-Na	meq. 100 g de suelo - cmol*Kg-1	Ext NH4 Ac –Abs Atómica
CICE	meq. 100 g de suelo - cmol*Kg-1	Acetato de amonio normal y neutro
Fe-Mn-Cu-Zn	ppm	Ext DTPA – Absorción Atómica
Conductividad Eléctrica C.E.	dSm-1	Extracto de Saturación (Conductivímetro)

Fuente: Parámetros Análisis agronómico CALS-ICONTEC, UPTC

- **Análisis metales pesados:** los parámetros a analizar en el Laboratorio Ambiental de la Universidad Pontificia Bolivariana de Medellín se presentan en la Tabla 3-2.

Tabla 3-2: Parámetros metales a analizar en la UPB, Laboratorio Ambiental

PARÁMETROS	UNIDAD mg/Kg Base Seca	MÉTODO DE ANÁLISIS
Arsénico	mgAs/ Kg(BS)	EPA-1620 EPA-3050B EPA-7061A
Cadmio	mgCd/ Kg(BS)	EPA-1620 EPA-3050B EPA-7130
Cobre	mgCu/ Kg(BS)	EPA-1620 EPA-3050B EPA-7210
Cromo Total	mgCr/Kg(BS)	EPA-1620 EPA-3050B EPA-7190
Mercurio	mgHg/ Kg(BS)	EPA-3050B EPA-7470A
Molibdeno	mgMo/Kg(BS)	EPA-1620 EPA-3050B EPA-7480
Níquel	mgNi/ Kg(BS)	EPA-1620 EPA-3050B EPA-7520
Plomo	mgPb/Kg(BS)	EPA-1620 EPA-3050B EPA-7420
Selenio	mgSe/Kg(BS)	EPA-1620 EPA-3050B EPA-7741A
Zinc	mgZn/Kg(BS)	EPA-1620 EPA-3050B EPA-7950

Fuente: Parámetros Metales pesados EPA

- **Análisis microbiológico**(*Salmonella*, Coliformes totales, Coliformes fecales y huevos de Helmintos): los parámetros a analizar en el Laboratorio de Microbiología de la Universidad pedagógica y Tecnológica de Colombia de Tunja se presentan en la Tabla 3-3

Tabla 3-3: Parámetros Microbiológicos a analizar en la UPTC, Laboratorio de Microbiología

PARÁMETROS MICROBIOLÓGICOS	UNIDAD	METODOLOGÍA
Coliformes totales	NMP/g	Número más probable NMP y confirmación en medio de cultivo EMB Merk
Coliformes fecales	UFC	Número más probable
<i>Salmonella sp</i> (NMP)	NMP/g	Número más probable NMP y confirmación en medio de cultivo Salmonella-Shigella Merk
Huevos de Helminto	Huevos viables / 4 gr de base seca	Recuento y viabilidad

Fuente: Parámetros microbiológicos EPA

De acuerdo a los resultados de los análisis de laboratorio los lodos de la PTAR del municipio de Chinavita se clasifican con base en los valores especificados por la normatividad EPA (Agencia de Protección Ambiental) en función de la composición química (metales pesados) y microbiológica (Coliformes fecales, coliformes totales, *Salmonella* y huevos de Helminto).

3.2.3 Alternativas para reducción de organismos patógenos

Búsqueda y revisión bibliográfica sobre los tratamientos anaerobio y químico para estabilización lodos residuales generados en las PTAR, analizando las ventajas y desventajas de cada proceso, para finalmente hacer la recomendación de manejo para la PTAR del municipio de Chinavita teniendo en cuenta los resultados del análisis microbiológico en lo referente a Coliformes fecales y huevos de Helmintos.

3.2.4 Selección de alternativas para utilización de los lodos

Teniendo en cuenta el trabajo de Dáguer, (2003) sobre aprovechamiento de los lodos en las principales PTAR del país y mediante búsqueda y revisión bibliográfica de otros autores sobre valorización y aprovechamiento de los lodos, se presentan algunas alternativas de uso de los lodos residuales de la PTAR del municipio de Chinavita y su factibilidad de aprovechamiento teniendo en cuenta aspectos sanitarios y ambientales, económicos y sociales para uso de los mismos.

3.2.5 Impacto económico, social y ambiental del aprovechamiento de lodos

Se presenta un análisis de aspectos ambiental, social y económico respecto a las alternativas de aprovechamiento de lodos de la PTAR del municipio de Chinavita, teniendo en cuenta que el trabajo se enmarca dentro de la línea de Biosistemas Integrados y de políticas ambientales que apuntan al Desarrollo Sostenible.

4. Resultados y Discusión

4.1 Caracterización de lodos

Del análisis de los lodos de la PTAR del municipio de Chinavita se obtienen los datos que determinan sus características así:

4.1.1 Parámetros agronómicos analizados

En la Tabla 4-1 se presentan los resultados de los parámetros agronómicos analizados de los lodos de la PTAR Chinavita y valores de referencia para algunos materiales orgánicos usados comúnmente.

Tabla 4-1: Parámetros agronómicos analizados frente a valores de referencia de materiales orgánicos comúnmente utilizados.

PARÁMETRO	LODO RESIDUAL (RESULTADO UPTC)	GALLINAZA COMUN *	LOMBRICOMPOST			ABONO ORGÁNICO****
			LOMBRINAZA **	PULPA DE CAFÉ***	MATERIA ORGÁNICA BIO-DEGRADABLE ***	
Materia Orgánica (M.O.)	29,4%	80%	34%	35%	60%	—
pH	6	8	6,9	7	7	>4 y < 9
Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)	20,53 meq/ 100 g/ cmol*Kg ⁻¹	—	—	—	—	mínimo 30 meq/100g/ cmol(+) Kg ⁻¹
Conductividad Eléctrica (CE)	3,89 ds/m	—	—	—	—	—

Sodio(Na)	2,97%	—	—	5%	1,5%	—
Fósforo (P ₂ O ₅)	34,8ppm	1.82%	23%	178 ppm	186 ppm	>1%
	0.00348%			0,0178%	0,0186%	
Calcio (Ca++)	16,9 meq. 100 g de suelo - cmol*Kg ⁻¹	1.55 %	3,4 %	22%	27%	—
	0,338%					
Magnesio (Mg++)	2,04 meq. 100 g de suelo - cmol*Kg ⁻¹	0.57 %	1,28%	22%	24%	—
	0,024684%					
Potasio (K ₂ O)	0,98 meq. 100 g de suelo - cmol*Kg ⁻¹	1.27 %	1,14%	40%	17%	mayor de 1%
	0,038318 %					
Sodio (Na)	0,61 meq. 100 g de suelo - cmol*Kg ⁻¹	—	—	—	—	—
	0,01403%					
Hierro (Fe)	110 ppm	283 ppm	—	13,5%	20%	—
	0,011%					
Manganeso (Mn)	9,08 ppm	196 ppm	—	45,8%	57%	—

	0,000908%					
Cobre (Cu)	3,57 ppm	32 ppm	—	3,1%	5%	—
	0,000357%					
Zinc (Zn)	29,2 ppm	135 ppm	—	30,6%	6,9%	—
	0,00292%					

Fuente: *Castro, 1998;** ICA-PRONATA, García, 2006, ***, ****NTC 5167

Evaluando los datos obtenidos en la caracterización agronómica de los lodos y haciendo una comparación con algunos parámetros de referencia de otros materiales orgánicos, se puede afirmar lo siguiente:

- En relación al contenido de la materia orgánica, el lodo residual presenta un porcentaje menor respecto al contenido de los otros materiales como lombrinaza y abono orgánico y mucho menor (aprox. 50 y 60 % menos) que el contenido de materia orgánica en la gallinaza y lombricompost de materia orgánica biodegradable.
- El valor de pH corresponde a un material de reacción moderadamente ácido, encontrándose dentro del rango que sugiere la NTC 5167
- La capacidad de intercambio catiónico CIC de los lodos producidos en la PTAR corresponde a un valor que está por debajo del valor presentado por la NTC 5167.
- En los lodos residuales se evidencia la presencia de elementos mayores (P y K) y menores (Ca, Mg, Mn, Zn, Fe, Cu), cuyo contenido es bajo en comparación con materiales como la gallinaza, lombricompost y abono orgánico.
- Los lodos evaluados aportan un porcentaje bajo de sodio y la conductividad eléctrica está por encima de los parámetros establecidos para análisis de suelos, pero no se considera un riesgo alto de salinización del suelo debido a las bajas dosis de aplicación recomendadas para este tipo de materiales orgánico.

En general se evidencia que los lodos residuales de la PTAR Chinavita tienen un contenido importante de materia orgánica, con un interesante rango de pH y con un bajo contenido de elementos nutrientes con referencia a otros materiales orgánicos utilizados en agricultura.

El contenido de materia orgánica permite que estos lodos residuales puedan ser utilizados en el suelo como enmienda orgánica, mejorando sus propiedades biológicas

(contenido de materia orgánica y vida del suelo) y sus propiedades físicas como la estructura, porosidad y por ende la densidad aparente con lo cual se aumenta el grado de resistencia mecánica de los suelos frente a acciones antrópicas (laboreo) o naturales como el efecto del golpe de la gota de lluvia sobre los agregados de suelo cuando están desprotegidos.

El aporte de materia orgánica al suelo permite mejorar la Capacidad de Intercambio catiónico ya que como coloide contribuye en la absorción de iones, en el almacenamiento de elementos nutrientes para las plantas y protegen físicamente a microorganismos (hábitat).

4.1.2 Análisis de metales pesados

En la Tabla 4-2 se muestra la concentración de metales pesados encontrada en los lodos de la PTAR Chinavita y la concentración máxima permitida según EPA, el Decreto 822 de 1998 y la norma técnica colombiana NTC 5167.

Tabla 4-2: Parámetros analizados y concentración máxima permitida para algunos materiales orgánicos

Elemento	Niveles de metales pesados encontrados en los lodos (ppm)	Máxima concentración permisible en lodos (ppm)*	Concentración del componente para una calidad excepcional, (mg/Kg) *	Límites máximos permisibles en compost (ppm)**	Límites para abonos orgánicos (ppm)***
Arsénico	< 0,500	75	41	54	41
Cadmio	< 0,500	85	39	18	39
Cobre	92,190	4300	1500	1200	-
Plomo	41,014	840	300	300	300
Mercurio	0,705	57	17	300	17
Níquel	10,432	420	420	180	420
Selenio	220,979	100	100	14	-
Cromo total	< 0,500	3000	-	1200	1200
Zinc	679,035	7000	2800	1800	-
Molibdeno	< 0,500	75	-	20	-

Fuente: *Norma EPA 503; **Decreto 822/98 Ministerio de Desarrollo; ***Norma Técnica Colombiana 5167

En referencia a los valores de la concentración de metales pesados de los lodos de la PTAR Chinavita (Tabla 4-2) que pueden ser potencialmente peligrosos, estos no están presentes en concentraciones que puedan limitar su uso de acuerdo a los parámetros

estipulados por la EPA, es decir que el lodo generado se puede considerar como ***lodo no peligroso***.

Los lodos no peligrosos pueden ser de Buena Calidad o de Mala Calidad según su contenido de metales pesados en forma más rigurosa según la normatividad propuesta por la EPA, "Concentración del componente para una calidad excepcional"; por lo tanto se puede observar que la concentración de metales pesados potencialmente peligrosos está también por debajo de esta propuesta más rigurosa, por lo que los lodos se pueden considerar como: ***lodos de buena calidad***.

De acuerdo a esta clasificación de la EPA, son lodos que pueden ser utilizados en actividades Forestales, de Recuperación de suelos degradados, Ornato, Elaboración de abonos y enmiendas, Cobertura final e intermedia en rellenos sanitarios y Materiales de construcción, fijando las cantidades máximas de las aportaciones anuales de lodos, o cuidando de no superar los valores límite aplicables a las cantidades de metales pesados que pueden aportarse al suelo; o prohibiendo su utilización cuando la concentración en los suelos de dichos metales supere los límites permisibles.

En relación con los límites máximos permisibles en compost y abonos orgánicos y los niveles de metales pesados, que pueden ser potencialmente peligrosos, encontrados en los lodos se observa que se encuentran presentes en concentraciones que no limitan su aprovechamiento como material orgánico.

4.1.3 Análisis microbiológico

Las características microbiológicas (coliformes fecales, Salmonella y huevos de Helminths) de los lodos e la PTAR de Chinavita y concentración máxima permitida de acuerdo al criterio de calidad según la EPA son presentadas en la Tabla 4-3.

Tabla 4-3: Parámetros y resultado análisis microbiológico

PARÁMETROS MICROBIOLÓGICOS	RESULTADO UPTC NMP/g	VALORES LÍMITE *EPA	
		LODO CLASE A	LODO CLASE B
Coliformes fecales	≥16000	<1000 NMP/g o UFC/g	<2000000 NMP/g o UFC/g
<i>Salmonella sp</i>	0,0	<3 NMP/4g	<2000000 NMP/g o UFC/g

Huevos de Helminto	148,5 Huevos viables / 4 gr de base seca	1 huevo viable/4 g	—
--------------------	---------------------------------------------------	--------------------	---

Fuente: Autor y *EPA, Code of Federal Regulations (CFR), 40 CFR parte 503

Según los límites de calidad microbiológica y de acuerdo a los resultados obtenidos (Tabla 4-3), en cuanto a *Salmonella sp*, no se encontró presencia en las muestras analizadas y para Coliformes Fecales y Huevos de Helminto los valores no cumplen con los requisitos microbiológicos para ser clasificados como Clase A, por lo tanto se clasifican como **lodos clase B** que corresponde a lodo de buena calidad que debe ser sometido a procesos de reducción significativa de patógenos (PRSP), para lo cual la EPA presenta alternativas de manejo cuyo objetivo es asegurar que los organismos patógenos y parásitos se reduzcan a niveles que difícilmente representen una amenaza para la salud pública y el ambiente bajo condiciones específicas de utilización.

Se deben tener en cuenta las restricciones de emplazamiento con respecto a la aplicación en el suelo de sólidos biológicos de clase B, sugeridas por la EPA que reducen el potencial de contacto de los humanos y animales con los sólidos biológicos hasta que los factores ambientales hayan reducido los organismos patógenos por debajo de los niveles detectables. Dentro de estas restricciones se limita el acceso a áreas que tienen un alto potencial de exposición al público, como parques y campos de juego, durante 12 meses después de la aplicación del lodo residual, además, las zonas de acceso restringido deben ser señalizadas y se limita el acceso a áreas de bajo potencial de exposición al público durante 30 días después de la aplicación de lodo residual.

4.2 Alternativas para reducción de organismos patógenos

De acuerdo con los anteriores resultados los lodos de la PTAR del municipio de Chinavita se clasifican como Tipo B, Lodos de Buena Calidad, por lo tanto son catalogados como lodos no peligrosos por su concentración de metales pesados, pero con una cantidad de microorganismos patógenos y parásitos a considerar por lo cual se tienen que tener en cuenta Procesos de reducción significativa de patógenos (PRSP).

Según las normatividad internacional y específicamente la Estadounidense EPA, es necesario cumplir los requerimientos de una de siguientes alternativas:

- **Monitoreo de organismos indicadores.** Pruebas para densidad de coliformes fecales como indicador de todos los organismos patógenos en el momento en que el lodo de aguas residuales se utilice o se disponga.
- **Uso de procesos de reducción significativa de patógenos (PRSP):** para este caso, la adición de cal y el secado en patios de arena podría ser factible, por su facilidad, y economía cumpliendo las especificaciones. Esto con el fin de reducir las

concentraciones de patógenos a valores muy cercanos a lodo clase A, pero que seguramente continuarían siendo clase B.

- **Uso de un proceso equivalente al PRSP:** el lodo de aguas residuales se somete a un PRSP, tal y como lo determine la autoridad competente.

Con estas alternativas se debe asegurar que los organismos patógenos se reduzcan a niveles que difícilmente representen una amenaza para la salud pública y el ambiente bajo condiciones específicas de utilización.

Dentro de los **Procesos de Reducción significativa de patógenos (PRSP) para la PTAR Chinavita** las alternativas más viables desde el punto de vista técnico, sanitario, y ambiental para estos lodos se encuentran la digestión anaerobia y la estabilización química con cal. De esta forma se puede garantizar la higienización de los lodos haciendo uso de unos de los procesos reconocidos por la EPA, reduciendo así por debajo de los niveles detectables los organismos patógenos del lodo, y pueden llegar a ser aprovechados sin las restricciones a lodos clase B relacionadas con patógenos.

- **Digestión anaerobia:** es un proceso de estabilización biológica en el cual hay degradación de sustancias orgánicas complejas sin oxígeno libre, se libera energía y mucha de la materia orgánica se convierte metano, CO₂ y agua por lo tanto queda poco carbono y energía para mantener actividad biológica y los sólidos restantes quedan estables.

Ventajas: proceso simple y sencillo de operar; aplicable en pequeña, mediana y gran escala, para residuos industriales y domésticos; produce gas metano que sirve como fuente de energía; reduce la masa total de lodos (del 25 al 45% son destruidos); bajo consumo de energía eléctrica por no requerir aireación; baja producción de biomasa alrededor del 10 % o menos, inactivación de patógenos; el lodo anaerobio puede permanecer sin alimento mucho tiempo; el arranque de los reactores es relativamente rápido, con una apropiada inoculación.

Desventajas: alto costo, ya que se requieren tanques cerrados de gran capacidad con sistemas de alimentación, calentamiento y mezcla; es susceptible a los cambios del medio ambiente que afectan a los microorganismos; produce flujos de alta demanda de oxígeno, incrementando el costo del tratamiento; largos tiempos de estabilización del sistema; el proceso es sensible a la temperatura, ubicación geográfica y tipo de material de fabricación del biorreactor; emisión de olores desagradables (H₂S) ;la agresividad de algunos subproductos que demandan atención en la protección de las estructuras (corrosión).

- **Tratamiento químico:** es un proceso que se implementa fácilmente en plantas de tratamiento pequeñas ; para la estabilización química se adicionan productos que inhiban la actividad biológica y oxiden la materia orgánica, en la cual una base, normalmente cal, se mezcla con el lodo para elevar el pH y destruir la mayor parte de los microorganismos patógenos.

El propósito principal es la reducción de patógenos a niveles por debajo del límite de la norma, que permitan su disposición segura su uso en la agricultura sin restricciones. Con la estabilización alcalina se pretende aumentar el pH por encima de 12 unidades y mantenerlo durante 72 horas como mínimo, para lograr la reducción significativa de patógenos y la estabilización del lodo; este valor de pH sobrepasa los límites de tolerancia para el crecimiento y supervivencia de organismos tan resistentes como los huevos de helmintos (EPA, 2003).

Para el manejo de los lodos residuales de la PTAR municipal de Chinavita, de acuerdo a los diferentes trabajos de investigación consultados y por la cantidad de lodos producidos en la PTAR se recomienda la *Estabilización con Cal* cuyas principales ventajas sobre el proceso de digestión anaerobia son su bajo costo (Tabla 4-4) y simplicidad de operación.

Proceso de estabilización con cal: se debe considerar el pH, tiempo de contacto y dosificación de cal, aunque se pueden emplear resultados anteriores es conveniente realizar pruebas de laboratorio y piloto para el establecimiento del proceso.

- pH y tiempo de contacto: se debe mantener el pH sobre 12 por dos horas mínimo para asegurarse de reducir el nivel de patógenos y proporcionar la suficiente alcalinidad residual para que el pH no descienda a menos de 11 por algunos días y permitir el tiempo suficiente para la disposición del lodo estabilizado.
- Dosificación de cal: se determina por el tipo lodo, composición química y concentración de sólidos; al respecto en Colombia se han llevado a cabo trabajos de investigación para diferentes PTAR, es el caso de la PTAR El Salitre de Bogotá, donde Araque *et al* (2006) evaluaron el tratamiento con Cal viva (CaO) en dosis de 25 %, 45 %, 65% y 85 % durante 43 días de contacto, evaluando la eliminación de indicadores de contaminación fecal (coliformes fecales, fagos somáticos y huevos de helmintos) y demostraron que una dosis de 25 % de cal viva es suficiente para eliminar los patógenos en 21 días de tratamiento, el tratamiento alcalino evaluado permitió alcanzar un producto clase A .

Para Torres,*et al.*, (2008) en su trabajo de investigación, el aumento del pH a valores superiores a 12 unidades por lo menos 72 horas con la aplicación de cal viva o hidratada en un rango de dosis del 8 al 15 %, fue el mecanismo que permitió la eliminación de microorganismos patógenos, permitiendo alcanzar un material clase A, incluso sin alcanzar el estándar de temperatura recomendado.

Para Jiménez, *et al.*, (2001) las dosis requeridas para lograr la estabilización varían de acuerdo al contenido de agua presente en el lodo; en general para lodos con mayor contenido de sólidos la dosis de cal es menor (15%) que para lodos más húmedos. Los resultados del estudio mostraron que aunque la resistencia de los huevos de helmintos a la cal viva es superior a la de otros microorganismos, es posible reducir significativamente su concentración y en general la inactivación de coliformes fecales, *Salmonellas* y huevos de helminto se presenta después de 48 horas de contacto con dosis entre 15 y 25% de cal viva.

Selección del tipo de cal: El fundamento de la estabilización del lodo con cal es la creación de condiciones fisicoquímicas capaces de inhibir el proceso de degradación biológica de la materia orgánica que éste contiene, evitando así la producción de malos olores (Hernández, 1996). Valores elevados de pH crean un entorno que impide la supervivencia de los microorganismos (Metcalf y Eddy, 1998). El tratamiento puede hacerse mezclando con el lodo tanto con cal viva (CaO) o cal hidratada (Ca(OH)₂):

El hidróxido de calcio, Ca(OH)₂, también denominado cal apagada, es un compuesto alcalino que consigue niveles de pH superiores a 12, provocando la ruptura en las membranas de las células de los agentes patógenos. Un elevado pH representa una barrera repelente para vectores, evitando que moscas u otro tipo de insectos depositen sus huevos infectando el lodo tratado. Dado que la cal es de baja solubilidad en el agua, las moléculas de ésta persisten en los lodos.

El óxido de calcio, CaO, conocido como cal viva, al mezclarse con lodo, produce una reacción exotérmica, debido al alto contenido de agua de los lodos. Esto permite elevar la temperatura de la mezcla sobre los 50 °C, además de elevar el pH (Metcalf y Eddy, 1998)

Los criterios de selección tienen que ver con la facilidad de adquisición, calidad del material, riesgos, requisitos de manipulación, costos del producto y costos asociados a la manipulación.

En la literatura se recomiendan ambos productos, siendo la cal viva en presentación molida la de mayor utilización ya que una fina granulometría ayuda a una mejor homogenización en la mezcla.

Almacenamiento de la cal: volúmenes menores a una tonelada diaria se maneja en bolsa y su almacenamiento es sencillo.

- La cal hidratada se debe almacenar en condiciones secas hasta por un año, sin inconvenientes.
- La cal viva se almacena en bolsas multicapas a prueba de agua y por un período no mayor a 3 meses

Alimentación de cal hidratada: para esta planta que es pequeña, se mezcla la cal con agua en un tanque y se añade al tanque de mezclado en la proporción requerida.

Alimentación y apagado de la cal viva: se mezcla una parte de cal viva con dos o tres partes de agua en un recipiente de acero movido con un agitador y dejar en reposo por 30 minutos para hidratación completa.

Mezclado: el tanque de mezclado debe ser capaz de mezclar los lodos con la lechada de cal y contener la mezcla durante 30 minutos; la agitación (mecánica o con aire difuso) debe ser suficiente para mantener los sólidos en suspensión y distribuir la lechada de cal uniforme y rápidamente.

Estabilización de los lodos: llevar el lodo a un pH 12.5 y mantenerlo arriba de 12,5 por 30 minutos, lo cual conserva el pH mayor a 12 por dos horas, para su posterior manejo, con grandes ventajas como:

- En el tratamiento con cal no ocurre reducción de materia orgánica
- La cantidad de lodo aumenta por la adición de cal, generando mayor volumen de material estabilizado para reuso.
- No se requiere un equipo sofisticado para el tratamiento.
- Las reacciones químicas que se desarrollan son relativamente sencillas.
- No hay necesidad de un secado previo del material a procesar, ya que de hecho, el agua es necesaria para el desarrollo de las reacciones químicas.
- El lodo pierde fácilmente su humedad siendo así de muy fácil manejo para su aplicación al suelo como enmienda o para disponerlo en el relleno sanitario.
- No genera lixiviados en el proceso por lo tanto no es necesario contar con un área que reúna características especiales para el depósito final.
- Se suprime el riesgo de contaminación ambiental por patógenos y parásitos

El tamaño de la PTAR del municipio de Chinavita y la producción de lodos residuales (2 toneladas cada cuatro meses) son condiciones que hacen que la alternativa de estabilización química sea considerada sencilla y económica. En la (Tabla 4-4) se presenta el costo total de dos tipos de cal que pueden ser utilizados para la estabilización química de 500 kg (promedio mensual de producción PTAR), teniendo en cuenta las recomendaciones que presentan en los trabajos de investigación de Torres et al., (2008) y Jiménez, *et al.*, (2001), para lo cual se tiene en cuenta únicamente el valor de la materia prima. De lo cual se deduce que el tratamiento de estabilización química implica costos muy bajos para la PTAR Chinavita, cualquiera que sea el tipo de cal utilizada.

Tabla 4-4: Costo total de la materia prima para estabilización de lodos residuales PTAR Chinavita

TIPO DE CAL	CANTIDAD kg	VALOR UNITARIO	LODOS A ESTABILIZAR kg	RECOMENDACIÓN DE CAL*	CANTIDAD DE CAL REQUERIDA kg	VALOR TOTAL \$
Cal Viva CaO	50 kg	\$ 5500	500 kg	15%	75 kg	\$ 8.250
				20%	100kg	\$11.000
				25%	125 kg	\$13.750
Cal Apagada Ca (OH) ₂	50 kg	\$ 9800	500 kg	15%	75 kg	\$14.700
				20%	100kg	\$19.600
				25%	125 kg	\$24.500

Fuente: Autor; *Torres, *et al* (2008) ; *Jiménez, *et al*(2001)

4.3 Alternativas para el aprovechamiento de los lodos residuales

Daguer, (2003) en su trabajo sobre la Gestión de Biosólidos en Colombia argumenta que la gestión de estos lodos residuales debe contemplar la mayor cantidad de opciones de aprovechamiento entre las cuales están:

- Uso Agrícola y pecuario
- Silvicultura (plantaciones forestales, viveros)
- Recuperación de suelos degradados
- Adecuación de zonas verdes (separadores viales, parques)
- Elaboración de abonos y enmiendas
- Cobertura intermedia o final de rellenos sanitarios
- Biorremediación de suelos contaminados
- Elaboración de materiales de construcción

Además menciona Daguer, (2003) que para las principales Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales de Colombia se han realizado las siguientes investigaciones con el fin de establecer la mayor cantidad de posibilidades de aprovechamiento de biosólidos:

PTAR El Salitre (Bogotá)

- Aprovechamiento como cobertura final en el relleno sanitario Doña Juana
- Compostaje de biosólidos
- Biorremediación de suelos contaminados
- Aprovechamiento forestal
- Recuperación de suelos degradados

PTAR San Fernando (Medellín)

- Recuperación suelos degradados
- Compostaje de biosólidos
- Revegetación de taludes
- Aprovechamiento agricultura
- Biorremediación de suelos
- Lombricultura de biosólidos

PTAR Cañaveralejo (Cali)

- Aprovechamiento como cobertura final del botadero Basureo de Navarro
- Aprovechamiento agrícola
- Compostaje de biosólidos
- Lombricultura de biosólidos
-

PTAR Río Frío (Bucaramanga)

- Compostaje de biosólidos
- Aprovechamiento forestal en viveros de la Corporación de la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB)

Teniendo en cuenta la información presentada por Daguer, (2003) y revisando información bibliográfica de cada una de las alternativas de uso reportadas por los diversos trabajos de investigación al respecto se presenta un cuadro de factibilidad (Tabla 4-5) que resume las opciones de aprovechamiento para los lodos de la PTAR del municipio de Chinavita.

Tabla 4-5: Alternativas de aprovechamiento de los lodos de la PTAR

ALTERNATIVA DE APROVECHAMIENTO	ASPECTO SANITARIO Y AMBIENTAL	ASPECTO SOCIAL
Uso Agrícola y pecuario	Factible	No Factible
Silvicultura (plantaciones forestales y viveros)	Factible	No Factible
Adecuación de zonas verdes (separadores viales, parques, ornato, recreación)	Factible	No Factible
Elaboración de abonos y enmiendas	Factible	Factible
Recuperación de suelos degradados	Factible	Factible

Fuente: Autor

De acuerdo a la Tabla 4-5 y teniendo en cuenta los aspectos sanitario y ambiental y aspecto social las alternativas de aprovechamiento se caracterizan así:

- Uso Agrícola y pecuario: como abonos o enmiendas en cultivos agrícolas y pastizales. Socialmente, no es factible la alternativa de uso ya que se deben limitar las rutas de exposición de una comunidad a los patógenos presentes en los lodos ya que se pueden general impactos negativos.
- Silvicultura: como abonos o enmiendas en plantaciones forestales, viveros o bosques naturales. Socialmente, no es factible la alternativa de uso ya que se deben limitar las rutas de exposición de una comunidad a los patógenos presentes en los lodos ya que se pueden general impactos negativos.
- Áreas destinadas al ornato y la recreación: como sustrato orgánico para la construcción o adecuación de parques públicos y en zonas verdes y separadores de vías. Socialmente, no es factible la alternativa de uso ya que se deben limitar las rutas de exposición de una comunidad a los patógenos presentes en los lodos ya que se pueden general impactos negativos.
- Recuperación de suelos degradados: como sustrato orgánico o enmienda en suelos degradados naturalmente o por actividades antrópicas. Es una alternativa factible, siempre y cuando se logre la reducción de las concentraciones de patógenos y se evite el contacto directo con el material.

- Elaboración de abonos y enmiendas: como insumo en la elaboración de abonos orgánicos o enmiendas orgánicas. Es una alternativa factible, siempre y cuando se logre la reducción de las concentraciones de patógenos mediante la estabilización del mismo.

Alternativa de aprovechamiento recomendada para la PTAR del municipio de Chinavita: Los lodos obtenidos de la planta de tratamiento de aguas residuales del municipio de Chinavita pueden ser usados como enmienda orgánica ya que corresponden a un material con un contenido importante de materia orgánica, que sería utilizado fundamentalmente para mantener o aumentar el contenido de materia orgánica del suelo, mejorar sus propiedades físicas y mejorar la actividad biológica en un suelo. Los efectos físicos sobre el suelo deben ser similares a los obtenidos con las aplicaciones de otros tipos de materiales orgánicos y pueden ser:

- Cambios en la estructura, con un aumento en la estabilidad de los agregados; según Cuevas et al., (2006) con aportes de hasta un 5% (base materia seca) de lodos urbanos se generan aumentos de hasta un 78% de la estabilidad de agregados respecto a la condición inicial de un suelo, lo que lleva al aumento del diámetro medio de los agregados, y por lo tanto favorece el movimiento del agua y del aire.
- Aumento de la macroporosidad, con redistribución del sistema poroso teniendo efectos positivos sobre la capacidad de retención de agua y por lo tanto hay disminución de en la densidad aparente, ya que se generan mayor cantidad de espacios dentro de la matriz del suelo por efecto del material orgánico (lodo residual) que se adiciona.
- Mejora el nivel de hidrofobicidad (impermeabilidad) del suelo, ya que de acuerdo al contenido de materia orgánica del lodo, mejora la estabilidad de agregados y disminuye la erodabilidad del suelo.
- Aumenta el grado de resistencia mecánica de los suelos frente a acciones antrópicas (laboreo) o naturales como el efecto del golpe de la gota de lluvia sobre los agregados de suelo cuando estos están desnudos.
 - La aplicación de lodos residuales materia orgánica presenta efectos positivos en algunas propiedades físico mecánicas de suelo, como la densidad aparente y la porosidad gruesa (estructural), sin embargo, se deben evaluar efectos a largo plazo, ya que los cambios en las propiedades físicas del suelo al aplicar residuos orgánicos pueden variar rápidamente en el tiempo y con el manejo.
- Las aplicaciones en cantidades excesivas de estos lodos (material orgánico), o aplicaciones en suelos con un alto contenido de materia orgánica, pueden provocar hidrofobicidad, y aparición de sellado superficial y flujos preferenciales, una menor tasa de infiltración y una mayor escorrentía superficial.
- Los lodos usados como enmienda se deben la incorporar al suelo para generar una mejor condición física, ya que dejarlos esparcidos sobre el suelo, produce efectos negativos como hidrofobicidad provocando un sello superficial y por lo tanto aumento de la escorrentía.

Los efectos de la aplicación de estos lodos residuales son predominantemente físicos, ya que los efectos en la parte nutricional dependen de la composición química.

4.4 Impacto económico, social y ambiental del aprovechamiento de los lodos

4.4.1 Económico

En lo referente a los objetivos económicos, se vislumbra un valor agregado a un subproducto que se estaba convirtiendo en foco de contaminación y de acuerdo a las políticas actuales y las prospectivas a futuro estos desechos y residuos generados de las actividades humanas primarias tendrán una gran utilización en campos relacionados como la agricultura, la recuperación de suelos agotados, la horticultura, la utilización en jardines y el compostaje, ya contienen gran cantidad de nutrientes y microorganismos potencialmente utilizables y con altas posibilidades de comercialización y generación de ingresos para las administraciones de la PTAR.

Social y políticamente la práctica de la reutilización hace que la administración que está dedicada a gestionar estos subproductos evolucione hacia lo que hoy en día la sociedad espera en temas ambientales. La conversión de estos residuos domésticos en productos de valor agregado proporcionan una estrategia para crear un ambiente saludable a la vez que genera ingresos y empleo para la comunidad lo cual significa darle una mirada diferente al capital natural y su relación con la calidad de vida.

Con lo planteado, la estrategia general que guíe el manejo correcto de lodos debe contener acciones de: prevención, reuso o revalorización y disposición ambientalmente adecuada de los mismos. La prevención consiste en reducir potencialmente la generación de lodos al reducir la contaminación y uso del agua. El reuso o revalorización de los lodos generados se puede lograr reciclando el agua, metales u otros materiales residuales generados en los procesos de producción, sin embargo; lo que no pueda ser revalorizado debe ser dispuesto finalmente de manera ambientalmente adecuada y segura. En el marco de los Biosistemas Integrados estos lodos estabilizados mediante el uso de cal, pueden ser utilizados cerrando el círculo productivo, para los diferentes usos en forma segura o con algún grado de riesgo controlado, contribuyendo de esta manera a aumentar la productividad.

4.4.2 Social

La investigación se enfoca a solucionar la problemática relacionada con la gestión integral de residuos y contaminantes y se presenta como una de las alternativas de solución a las considerables alteraciones al medio ambiente ocasionadas por el incremento de la población mundial, asociado con la necesidad de mejorar su calidad de vida y aumentar la producción de alimentos junto con un esfuerzo de todos los sectores de la sociedad, que de una u otra forma, generan desechos que contaminan el ambiente.

En los últimos años los problemas derivados de escasez de recursos y degradación ambiental se han convertido en mecanismos de presión para los sistemas tradicionales de producción, que genera acuerdos en cuanto a la necesidad de una visión a largo plazo y orientación de la producción y generación de residuos hacia el desarrollo sostenible y por lo tanto se ha incrementado la puesta en marcha de políticas ambientales que llevan al pago por incumplimiento de normas ambientales, el uso de tecnologías amigables con el ambiente.

Dentro del marco del desarrollo de estas políticas ambientales, el desafío más grande, es desarrollar esquemas que, al mismo tiempo que resuelven los graves problemas que conllevan la generación y el manejo inadecuado de subproductos del proceso de tratamiento de aguas residuales, atiendan la necesidad que tiene el país de un desarrollo sostenible, incluyente y equitativo, que reduzca los niveles de pobreza, que fomente la creación de fuentes de ingresos y de empleos, que eleve la competitividad de los sectores y que mejore el desempeño ambiental de todos los actores y sectores sociales que generan y manejan residuos lodos residuales que generan impacto ambiental de una u otra forma.

4.4.3 Ambiental

El trabajo de investigación se encaminó en la selección de alternativas de valoración o aprovechamiento de los lodos generados en la planta de tratamiento de aguas residuales del municipio de Chinavita, lodos que es necesario eliminar o darles la salida más adecuada ya que hacen parte del incremento en la producción de residuos sólidos generados por el crecimiento urbano, debido al aumento de la población y a la emigración de los habitantes rurales a zonas urbanas.

Hoy en día, el problema de contaminación de las aguas se encuentra en su mayor parte solucionado, se han ido desarrollando nuevas técnicas, tanto a nivel urbano como industrial, los procesos se han ido mejorando, con el objeto de obtener las mejores calidades y máximos rendimientos en los efluentes que se vierten al medio en unas condiciones tales que no produzcan impactos en el medio ambiente, ni supongan un riesgo para los humanos y animales. Sin embargo, estos procesos de depuración generan una serie de residuos, los conocidos lodos residuales, cuyo fin es el de retener los contaminantes antes arrastrados por las aguas. Si se plantea la gestión integral de las aguas residuales, no se pueden dejar de lado los lodos que se producen, su gestión adecuada es indispensable al igual que conocer la calidad de los residuos obtenidos, en cuanto a su composición química y física, y deben incluirse dentro de los planes de gestión de las PTAR, cuyo funcionamiento no debe reducirse sólo a la calidad de las aguas.

La preocupación de los gestores actuales de la planta de tratamiento de aguas residuales, tanto la administración pública municipal como la empresa de servicios de públicos EMPRESA SOLIDARIA DE SERVICIOS PUBLICOS DE CHINAVITA. EMSOCHINAVITA E.S.P., se encuentra en la búsqueda a una solución real y con futuro para el destino final de estos lodos, con el mínimo impacto ambiental y que permita a su vez la valorización de las materias que contienen.

De acuerdo con Serna *et al.*, (2010), las nuevas políticas ambientales en relación con la gestión integrada de residuos sólidos, donde la responsabilidad es del productor de los bienes o servicios para que maneje y disponga en forma adecuada los residuos que se deriven de su proceso, abre una perspectiva alentadora a la implementación de Biosistemas Integrados para el aprovechamiento de éstos (para el caso los lodos residuales) y la inclusión de otros campos para la investigación y desarrollo de procesos de transformación y la gestión eficiente de las materias primas.

La investigación y desarrollo de sistemas para el tratamiento y aprovechamiento de estos residuos orgánicos resulta importante para nuestro país, dada la necesidad de conservación del medio ambiente, el cual se constituye en un patrimonio común y, por la conveniencia de detener la creciente degradación ambiental originada por la contaminación de agua a raíz de la disposición inadecuada de residuos producidos en el proceso de tratamiento de aguas residuales.

Actualmente, los lodos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales, no se utilizan ni disponen de forma adecuada, ocasionándose una pérdida: ambiental, agronómica, energética y económica de los nutrientes propios de estos potenciales biosólidos.

Muchos países del mundo han desarrollado estudios para determinar las características propias de los lodos generados en algunas de sus regiones y sus posibles aplicaciones, las cuales dependen de las características de las aguas residuales y de los sistemas de tratamiento empleados para depurarlas. Colombia comienza a incursionar en la utilización de estos recursos, porque son pocas las plantas de tratamiento de aguas residuales que han comenzado a operar en el país o y por el temor a utilizar residuos generados del tratamiento de aguas contaminadas los cuales puedan llegar a generar problemas sanitarios.

Las características y cantidad de estos lodos domésticos generados en PTAR los hacen especiales o peligrosos, la disposición hasta ahora ha sido básicamente en rellenos sanitarios, pero el creciente rechazo de la comunidad a tener cerca de su entorno rellenos sanitarios y una mayor presión de parte de las entidades ambientales para exigir un manejo adecuado de estos rellenos crea la necesidad de disponer de opciones alternativas para la disposición de estos residuos, como el tratamiento químico con cal que sean compatibles con el medio ambiente y adicionalmente que tenga un costo racional para el generador que deberá pagar por su disposición final.

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

De acuerdo a la caracterización microbiológica (Coliformes fecales, *Salmonella* y huevos de Helminto) de los lodos en la PTAR del municipio de Chinavita en Boyacá se puede determinar que corresponden a un material Clase B (normatividad EPA), lo cual significa que requiere la reducción de los patógenos para potenciar su aprovechamiento.

En referencia a los valores de la concentración de metales pesados de los lodos de la PTAR Chinavita que pueden ser potencialmente peligrosos, estos no están presentes en concentraciones que puedan limitar su uso de acuerdo a los parámetros estipulados por la EPA, es decir que el lodo generado se puede clasificar como lodo no peligroso.

Respecto a la concentración del componente para una calidad excepcional (EPA) la concentración de metales pesados potencialmente peligrosos está también por debajo de los límites permisibles, por lo que los lodos se pueden considerar como lodos de buena calidad.

En relación a los límites máximos permisibles de metales en compost y abonos orgánicos, los valores de metales pesados que pueden ser potencialmente peligrosos en los lodos de la PTAR Chinavita se observa que se encuentran presentes en concentraciones que no limitan su aprovechamiento como material orgánico.

De los valores obtenidos en el análisis de parámetros agronómicos se evidencia que los lodos presentan cantidades mínimas de elementos nutrientes, una cantidad moderada de materia orgánica y un pH dentro del rango, al ser comparados con parámetros establecidos para otros materiales orgánicos.

Por el contenido de materia orgánica, los lodos de la PTAR pueden ser aprovechados como enmienda orgánica para mejorar las propiedades físicas y biológicas de los suelos.

5.2 Recomendaciones

Los lodos residuales pueden ser utilizados en mezcla con otros residuos orgánicos que aporten los elementos nutrientes que se encuentran en mínimas concentración.

Se debe realizar en forma periódica la caracterización química y microbiológica de los lodos residuales de la PTAR, para determinar su potencial de aprovechamiento de acuerdo a su contenido tanto de metales pesados como de patógenos y parásitos.

Para la estabilización química de los lodos residuales se requiere un trabajo de investigación con el cual se logre determinar el tipo de cal a utilizar y la dosis ideal que logre la reducción significativa de patógenos y parásitos de acuerdo a los parámetros de la EPA.

Para el reúso de estos residuos de la PTAR Chinavita se debe tener en cuenta que la presencia de sales solubles en los lodos pueden contribuir a la salinización del suelo y por lo tanto a la fertilidad del mismo.

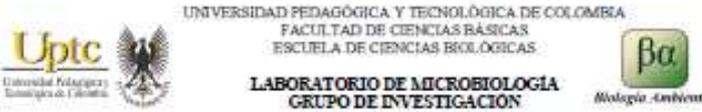
Se hace necesario establecer una normatividad con respecto a la calidad microbiológica de los lodos provenientes de las plantas de tratamiento de aguas residuales PTAR ya que no se dispone de leyes, reglamentos o normas sobre la gestión de biosólidos en nuestro país.

A. Anexo: Resultado del Análisis Agronómico

UNIVERSIDAD PEDAGOGICA Y TECNOLOGICA DE COLOMBIA																								
Facultad de Ciencias Agropecuarias - Instituto de Investigaciones Agrarias																								
Laboratorio de Diagnóstico en Suelos y Aguas																								
FINCA LUCÍA VALDERRAMA										Finca (a.s.n.m.) PLANTA DE TRATAMIENTO										Fecha Análisis				
										Departamento BOYACÁ										Año 2013				
										Municipio CHINAVITA										Mes 5				
										Vered										Día 7				
										Tipo de análisis COMPLETO										Cultivo LODO PLANTA DE TRATAMIENTO				
RESULTADOS DEL ANALISIS DE SUELOS																								
Muestra	Prof. cm	% (g/100g)			Clase Textural	pH	% (ppm)		meq. 100 g de suelo - cmol ⁺ Kg ⁻¹							Elementos menores (ppm)					CE. dS m ⁻¹			
		A	L	Ar			M.O.	Bray II	Al ³⁺	Al	Ca	Mg	K	Na	CICE	S	Fe	Mn	Cu	Zn		B	Al	Na
3					Orgánica	6,0	29,4	34,3	0,0	0,0	16,9	2,04	0,98	0,61	20,53		110	9,08	3,57	29,2		-	2,97	3,89
VALORES DE REFERENCIA						5,6 7,3	6-10 Frio 3-5 Medio 2-4 Caliente	20-40			3-6	1,5-2,5	0,2-0,4	0-1	10-20	8-12	60-100	20-60	2-4	3-6	0,3-0,6	<15	<7	0-2
Cationes Solubles (ppm)										Relaciones Cationicas (meq/100g - cmol ⁺ Kg ⁻¹)														
Calcio		Magnesio		Potasio		Sodio		NH ₄		NO ₃		Ca/Mg		Ca/K		Mg/K		K/Mg		(Ca+Mg)/K				
												323		8,26		17,2		2,08		0,45		19,3		
VALORES DE REFERENCIA		40-100-160		9-18-28		20-39-59		11-32-92		5-7-9		28-79-112		3-5		12-18		6-8		0,2-0,3		12-20		
METODOS ANALITICOS (CAL5 - ICONTEC)										Total Cancelado: \$ 91.000.00														
Mediante: KCl 1 N					Boro: Agua Caliente					Recibo de caja No. 141221 BANCO CORPBANCA					Vo Bo. GABRIELA MERCHAN ESPITA									
Walkley - Black					Azufre: Fosfato Monocálcico					Fecha de Entrega: 23/05/2013					Procedimientos Analíticos									
Bray II - Colorimetría					C.E. Extracto de saturación (Conductivímetro)										Vo Bo. FABIO EMILIO FORERO ULLOA									
Ext. NH ₄ Ac - Abs Atómica					Textura: Bouyoucos (F. Franco - A. Arias - L. Lima - A. Pardo)										Interpretación diagnóstico y pronóstico									
Ext. DTPA - Abs Atómica															La Universidad, al servicio del campo									

Fuente: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Laboratorio de Suelo y Agua

B. Anexo: Resultados del Análisis Microbiológico



UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS
ESCUELA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS

LABORATORIO DE MICROBIOLOGÍA
GRUPO DE INVESTIGACIÓN
BIOLOGÍA AMBIENTAL

Tunja, mayo de 2013

Ingeniera Agrónoma
MARTHA VALDERRAMA
Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia

ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO DE MUESTRAS DE LODOS

1. Análisis de Coliformes: totales, fecales y de *Salmonella*

Volumen procesado de cada muestra: 100 mL.

Número de muestras procesadas: 1

Metodología empleada: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 18th edición. American Public Health Association 1992.

RESULTADOS DEL ANÁLISIS

- Análisis de Coliformes: Totales y Fecales:

Método: Número Más Probable (NMP) y confirmación en medio de cultivo EMB Merk® (Unidades Formadoras de Colonia-UFC)

Muestra	Coliformes fecales (NMP/100 mL)	Coliformes totales (UFC)	<i>Escherichia coli</i> (UFC)
1	≥ 16000	~300	~300

- Análisis de *Salmonella* spp.

Método: Número Más Probable (NMP) y confirmación en medio de cultivo Salmonella-Shigella Merk®

Muestra	Presuntiva presencia de <i>Salmonella</i> spp. (NMP/100 mL)	Confirmación de presencia de <i>Salmonella</i> spp. (UFC)
1	0,0	-

Laboratorio de Microbiología-Grupo de Investigación Biología Ambiental.
Avenida Central del Norte Via Paipa (Boyacá). Edificio de Laboratorios L-314.
Correo electrónico: bioambient@uptc.edu.co

Fuente: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia Tunja, Laboratorio de Microbiología

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS
ESCUELA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS

LABORATORIO DE MICROBIOLOGÍA
GRUPO DE INVESTIGACIÓN
BIOLOGÍA AMBIENTAL

2. Análisis de Parasitos

Volumen procesado de la muestra: 3000 mL

Metodología empleada: Norma mexicana NMX-AA-113-SCFI-1999

RESULTADOS DEL ANÁLISIS

Muestra	Huevos de Helmintos viables/4 g base seca
1	148,5

INDICADORES DE CONTAMINACIÓN DE BIOSÓLIDOS DE ACUERDO A "A PLAIN ENGLISH GUIDE TO THE EPA PART 503 BIOSOLIDS RULE" 1992.

CLASE	Criterio de calidad microbiológico		
	Coliformes fecales: NMP / g de producto final (base seca)	Salmonella spp. NMP / g de producto final (base seca)	Huevos de Helminto viables / g de producto final (base seca)
A	< 1000	< 3	< 1
B	≤ 2000000	-	-
C	Corresponde a los biosólidos que no cumplen con algún(o) de los parámetros definidos para las Categorías A o B y que no son considerados como residuos peligrosos de acuerdo con la normativa ambiental vigente.		

Luz Lizarazo

Ph. D. LUZ MARINA LIZARAZO FORERO
Coordinadora Laboratorio

Laboratorio de Microbiología-Grupo de Investigación Biología Ambiental.
Avenida Central del Norte Via Paipa (Boyacá). Edificio de Laboratorios L-314.
Correo electrónico: bioambiente@uptc.edu.co

Fuente: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia Tunja, Laboratorio de Microbiología

C. Anexo: Resultado del Análisis de Metales Pesados

 Universidad Pontificia Bolivariana		REPORTE DE RESULTADOS LABORATORIO AMBIENTAL			
CODIGO: II-FC-088 VERSIÓN: 01		CONSECUTIVO GIAS-141-13	COPA No 000-13	SUPLEMENTO No 001-13	Página 1 de 2
TIPO DE MUESTRA:		LODO			
FECHA DEL INFORME:		Agosto 21 de 2013			
EMPRESA SOLICITANTE:		MARTHA LUCIA VALDERRAMA			
DIRECCIÓN:		Carrera 9 N° 66 16 Barrio Parques del Nogal, Tunja			
TELÉFONO:		314 445 4318			
INTERESADO:		Martha Lucia Valderrama			
FECHA DE MUESTREO:		Abril 14 de 2013			
RESPONSABLE DEL MUESTREO:		El Cliente			
FECHA DE RECEPCIÓN:		Abril 16 de 2013			
FECHA DE ANÁLISIS:		Abril 16 a Mayo 14 de 2013			
NOMBRE DE LA MUESTRA:		LODO AGUAS RESIDUALES PTAR MUNICIPIO DE CHINAVITA			
ANÁLISIS	MÉTODO	UNIDADES	RESULTADO	INCERTIDUMBRE	
ARSENICO – RESIDUO	EPA-1620 EPA-3050 B EPA-7061 A	mg As/ Kg _(sól)	Menor de 0.500	0.020	
CADMIO – RESIDUO	EPA -1620 EPA-3050 B EPA-7130	mg Cd/ Kg _(sól)	Menor de 0.500	0.020	
COBRE – RESIDUO	EPA-1620 EPA-3050 B EPA-7210	mg Cu/ Kg _(sól)	92.190	1.844	
CROMO TOTAL – RESIDUO	EPA-1620 EPA-3050 B EPA-7190	mg Cr/ Kg _(sól)	Menor de 0.500	0.020	
MERCURIO – RESIDUO	EPA-3050 B EPA-7470 A	mg Hg/ Kg _(sól)	0.705	0.014	
MOLIBDENO – RESIDUO	EPA -1620 EPA-3050 B EPA-7480	mg Mo/ Kg _(sól)	Menor de 0.500	0.020	
NÍQUEL – RESIDUO	EPA-1620 EPA-3050 B EPA-7520	mg Ni/ Kg _(sól)	10.432	0.209	
PLOMO – RESIDUO	EPA-1620 EPA-3050 B EPA-7420	mg Pb/ Kg _(sól)	41.014	0.820	
SELENIO – RESIDUO	EPA-1620 EPA-3050 B EPA-7741 A	mg Se/ Kg _(sól)	220.979	4.420	
ZINC – RESIDUO	EPA-1620 EPA-3050 B EPA-7950	mg Zn/ Kg _(sól)	679.035	13.581	
UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA GRUPO DE INVESTIGACIONES AMBIENTALES CIRCULAR 1° No 70 – 01 BARRIO LAURELES, BLOQUE 11 INGENIERÍAS SEGUNDO PISO, MEDELLÍN - COLOMBIA SI TIENE ALGUNA INQUIETUD SOBRE LA CALIDAD DEL SERVICIO FAVOR COMUNICARSE CON NOSOTROS TELEFAX: 4112572 CONMUTADOR: 448998 EXT. 14035-14032 E-Mail: invest@upb.edu.co					

Fuente: Universidad Pontificia Bolivariana de Medellín, Laboratorio Ambiental

 Universidad Pontificia Bolivariana		REPORTE DE RESULTADOS LABORATORIO AMBIENTAL		
CODIGO: I-FC-086 VERSION: 01	CONSECUTIVO: GIAS-141-13	COPIA No 000-13	SUPLEMENTO No 001-13	Página 2 de 2
<p>ACLARACIÓN: Los anteriores resultados son válidos únicamente para la muestra analizada, son de carácter confidencial y de propiedad del cliente. No se permite la reproducción parcial y/o total del informe sin autorización del Grupo de Investigaciones Ambientales.</p> <p>OPINIONES: El personal del Laboratorio Ambiental se abstiene de hacer comentarios, interpretaciones o recomendaciones sobre los resultados, debido al desconocimiento de la información relacionada con el proceso en cuestión.</p> <p>NOTA 1: El punto en los resultados corresponde al separador de cifras decimales.</p> <p>NOTA2: Este informe reemplaza el informe original emitido el 14 de mayo de 2013.</p>				
ACLARACIONES				
<p>*Laboratorio acreditado por el IDEAM para los parámetros en la matriz Sólidos: Humedad, Nitrógeno Amoniacal, Nitrógeno Total Kjeldahl, pH, Sólidos Totales, Sólidos volátiles, DQO, Aluminio, Antimonio, Bario, Cadmio, Calcio, Cobalto, Cobre, Cromo, Estaño, Hierro, Magnesio, Manganeso, Mercurio, Molibdeno, Níquel, Plata, Plomo, Potasio, Selenio, Sodio y Zinc, Cianuro total.</p> <p>Muestreo: Método según Resolución 0062 de 2007.</p> <p>Parámetros en la matriz Residuos Peligrosos: Corrosividad (pH), Inflamabilidad, Reactividad, TCLP - para Metales: Aluminio, Antimonio, Bario, Cadmio, Calcio, Cobalto, Cobre, Estaño, Hierro, Magnesio, Manganeso, Mercurio, Molibdeno, Níquel, Plata, Plomo, Potasio, Sodio, Cromo, Selenio y Zinc.</p> <p>Muestreo: Método según Resolución 0062 de 2007.</p> <p>Según Resolución 2325 del 25 de Septiembre de 2012</p>				
ANÁLISIS SUBCONTRATADOS				
ANÁLISIS		LABORATORIO SUBCONTRATADO		
CONTROL DEL INFORME	PROFESIÓN Y NOMBRE	FIRMAS Y SELLO		
RESPONSABLE DEL ENSAYO	Tec. Gco Auner Ignacio Villa V			
RESPONSABLE DEL INFORME	Qca. Esp. Beatriz Elena Gómez Hoyos			
ACUSE DE RECIBO DEL CLIENTE				
<p>UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA - GRUPO DE INVESTIGACIONES AMBIENTALES CIRCULAR 1° No 70 - 01 BARRIO LAURELES, BLOQUE 11 INGENIERÍAS SEGUNDO PISO, MEDELLÍN - COLOMBIA SI TIENE ALGUNA INQUIETUD SOBRE LA CALIDAD DEL SERVICIO FAVOR COMUNICARSE CON NOSOTROS TELEFONO: 4112372 CONMUTADOR: 4489388 EXT. 14035-14032 E-MAIL: gea@unpbolivar.edu.co</p>				

Fuente: Universidad Pontificia Bolivariana de Medellín, Laboratorio Ambiental

Bibliografía

- Acosta González, Y., Gutiérrez, E., y Ramírez, E. (2003). Poder Fertilizante de los Lodos Residuales provenientes del Tratamiento de Aguas Servidas. Universidad del Zulia, Núcleo Punto Fijo. Venezuela.
- Acosta G. y Yudith M. (1995). Aplicación de los Lodos Provenientes de la Planta de Tratamiento de Aguas Servidas (TAS) de Maraven-Cardón para el Mejoramiento del Suelo. Maracaibo. Venezuela. Tesis de Grado Universidad del Zulia.
- Alcañiz, J.M. y Ortiz, O. (1998). Utilización de lodos de depuración en la rehabilitación de suelos decantera. (pp 28-34). Barcelona.
- Arana Ysa, V. (2009). Guía para la toma de decisiones en la selección de sistemas de tratamiento de aguas residuales no convencionales guitar. Foro ciudades para la vida. Primera edición. Lima. Perú
- Araque, M. P. (2006). Evaluación de los tratamientos térmico y alcalino en la desinfección del lodo generado en la PTAR El salitre. Bogotá, Colombia: Tesis de Maestría en Ingeniería Ambiental. Universidad de los Andes.
- Blanco Sandoval, J. O. (2006) Acondicionadores y mejoradores del suelo. ICA-PRONATTA. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. Cúcuta
- Builes, S. (2010). Tratamiento y adecuada disposición de lodos domésticos e Industriales monografía. Pereira: Facultad de Tecnologías. Universidad Tecnológica de Pereira.
- Castro F, H. (1998). Fundamentos para el Conocimiento y Manejo de Suelos Agrícolas. (pp. 360). Tunja: Instituto Universitario Juan De Castellanos.
- Cepeda, E. (2006). Análisis de alternativas para el uso y/o disposición final de los lodos generados en la planta de tratamiento de aguas residuales del municipio de Paipa. Tunja: Tesis de Grado Especialización en Ingeniería Ambiental. U.P.T.C.
- Colin, C. (1994). Nuevas aplicaciones de Lodos Residuales. México: Facultad de Química. Universidad Autónoma del estado de México.
- Colomer, F y otros. (2010). Opción de calorización de lodos de distintas estaciones depuradoras de aguas residuales. Ingeniería revista académica. Vol. 14 No.3. U autónoma de Yucatán.
- Consejo Nacional ambiental. (2001). Departamento Nacional de Planeación, Colciencias, Política Nacional de Investigación Ambiental. Bogotá.
- Cuevas, J., Seguel, O., Ellies, A., y Dörner, J. (2006). Efectos de las enmiendas orgánicas sobre las propiedades físicas del suelo con especial referencias a la adición de lodos urbanos. Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal VOL 6 No. 2 Chile.

Dáguer, G. (2003). Gestión de Biosólidos en Colombia. Revista Acodal 202. EPA. Agencia de Protección Ambiental. Control de patógenos y atracción de vectores en los lodos de depuradora.

http://www.epa.gov.co/OR_D/NRMRL/pubs/625r92013/625R92013.pdf. Environmental Protection Agency (EPA). (1993). Environmental regulations and technology. Control of pathogens and vector attraction in sewage sludge. (Última Consulta: Agosto 15 de 2013).

Environmental Protection Agency EPA. 1999. Environmental Protection Agency. Control of Pathogens and Vector Attraction in Sewage Sludge. EPA/625/R-92/013.

Fuccz Gamboa, J., Gómez Moreno, R., Cárdenas Guzmán, M. y Campos Pinilla. C. (2007). Comportamiento de Coliformes Fecales como Indicadores Bacterianos de Contaminación Fecal en Diferentes mezclas de Biosólidos y estériles utilizados para la Restauración Ecológica de la Cantera Soratama, UNIVERSITAS SCIENTIARUM, Revista de la Facultad de Ciencias Pontificia Universidad Javeriana. Edición especial II, Vol. 12, 111-120.

García, F. (2006). Principios Generales de Agricultura Orgánica. Fundación Universitaria Juan de Castellanos. Editorial JDC.Tunja

Grajales, S. Monsalve, J., y Castaño, J. M. (2006). Programa de manejo integral de los lodos generados en la planta de tratamiento de aguas residuales de la Universidad Tecnológica de Pereira. Scientia et Technica, Año XII, (No 31).

Guzmán, C. y Campo C. (2004). Indicadores de Contaminación Fecal en Biosólidos Aplicados en Agricultura. UNIVERSITAS SCIENTIARUM Revista de la Facultad de Ciencias Pontificia Universidad Javeriana Vol. 9(N° 1: 59-67)

Hernández, A. (1994). Depuración de Aguas Residuales. (pp. 987). Madrid: Cátedra de Ing. Sanitaria y Medio Ambiente. Escuela Técnica de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Tercera edición.

<http://chinavita-boyaca.gov.co/index.shtml>. Sitio web oficial del municipio de Chinavita en Boyacá. (Consulta: 9 de septiembre de 2013).

<http://es.scribd.com/doc/125643552/41-ESTUDIO-DE-LODOS-DE-DEPURADORA-1-pdf>. Estudio de los lodos de Depuradora. (Consulta: 10 de septiembre de 2013).

<http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/18831/capitulo2.pdf>. Tipo, características, manejo y disposición final de lodos. (Consulta: 28 de septiembre de 2013).

Jiménez, B., Barrios, J. y Maya, C. (2001). Estabilización alcalina de lodos generados en un tratamiento Primario avanzado. Instituto de Ingeniería UNAM, México, D.F.

Martínez, D. (2003). Análisis comparativo de diseño de lagunas de estabilización para ciudades pequeñas y medianas. Instituto Politécnico Nacional. Escuela Superior de

Ingeniería y Arquitectura. Unidad profesional Zacatenco. México D.F.

Martínez Oliver, E. (2007). Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Diseño de Lagunas de Estabilización. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, D.F.

Metcalf, L. y Eddy, H. (1995) Ingeniería de Aguas Residuales. Tratamiento, Vertido y Reutilización. España: McGraw Hill. Tercera Edición. Volumen I y II.

Ministerio de Desarrollo Económico. Resolución 822 de 1998. Reglamento Técnico del Sector Agua Potable y Saneamiento Básico.

Norma Técnica Colombiana 5167. (2004). Materiales orgánicos utilizados como fertilizantes o acondicionadores de suelos. Icontec. Bogotá.

Olivos Lara, O. E. (2010). Tratamiento Primario. Universidad Alas Peruanas. Facultad de Ingeniería Ambiental. Lima – Perú.
<http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/19117/Capitulo2.pdf>

Oropeza, N. (2006). Lodos residuales: estabilización y manejo. *Caos Conciencia* 1: 51-58, Departamento de Ingeniería, Universidad de Quintana Roo, México

Ortiz Pineda, C., (2010). Prevalencia de huevos de helmintos en lodos, Agua residual cruda y tratada, provenientes de un sistema de tratamiento de aguas residuales del municipio el Rosal, Cundinamarca. Universidad Nacional de Colombia Facultad de ciencias. Bogotá, D.C

Salcedo Pérez, E, Vázquez Alarcón, A. Krishnamurthy Rediar, L. Zamora Natera, F. Hernández Álvarez, E y Rodríguez Macías R. (2007). Evaluación de lodos residuales como abono orgánico en suelos volcánicos de uso agrícola y forestal en Jalisco, México. *Red de revistas científicas de América latina, el Caribe, España y Portugal. Interciencia*, vol. 32, núm. 2, pp. 115-120.

Serna, C., Salazar, M., y Rodríguez, N. (2010) *Biosistemas Integrados y sus interrelaciones con el Desarrollo Sostenible y el Desarrollo Humano y Social*. Editor: CORPOCALDAS. Manizales.

Soáñez, M. (2002). Manual de Tratamiento, Reciclado, Aprovechamiento y Gestión de Aguas Residuales de las industrias agroalimentarias. España: Ediciones Mundiprensa.

Torres C, E. (1997). Reutilización de aguas y lodos residuales. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid. Master of Science en Física y Química de Suelos.

Torres Lozada, P., Madera Parra, C.A y Martínez Puentes, G. (2008). Estabilización Alcalina de Biosólidos Compostados de Plantas De Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas para Aprovechamiento Agrícola. *Revista Facultad Nacional de Agronomía*, vol.61(no.1).

Trejos Vélez, M., y Agudelo Cardona, N. (2012). Propuesta para el aprovechamiento de lodos de la planta de tratamiento de aguas residuales de la empresa “Comestibles La Rosa” como alternativa para la generación de biosólidos. Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira.