

## MANEJO DE SÓLIDOS RESIDUALES O BIOSOLIDOS

### 9.0 ANTECEDENTES Y ORIGEN DE LOS LODOS RESIDUALES

Las aguas residuales que se vierten al drenaje contienen desechos propios de un sistema de este tipo. Aproximadamente se integran a ésta agua un gramo de materia orgánica y desecho por cada litro, representando el 0.1% de materia que no se encontraba originalmente en el agua potable, haciéndola inadecuada para su posterior uso.

Esta contaminación en su mayoría es materia biodegradable, que es removida por un proceso biológico. Este proceso consiste de un Reactor Biológico o Digestor de Materia Orgánica, donde se encuentra una gran cantidad de microorganismos que se encargan de consumir el material orgánico biodegradable en su provecho. Tal proceso es llamado "Tratamiento con Lodos Activados". El término "lodo" se debe a la semejanza con un lodo o fango y "activado", es debido a que la masa microbiana que forma estos lodos tienen una gran actividad biológica y están dispuestos a consumir el material orgánico que sea biodegradable o asimilable por los microorganismos.

El material orgánico que entra desde el sistema de drenaje al digestor biológico es medido como Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), y dicho material es consumido por la biomasa o masa microbiana (Lodos Activados).

Una parte del material orgánico se convierte en masa celular y el resto es emitido a la atmósfera en forma de gases no contaminantes como bióxido de carbón, vapor de agua y en el proceso de respiración de las células.

Para que este proceso se lleve a cabo sin la formación intermedia de productos indeseables se deben tener condiciones aerobias, ya que las bacterias aerobias son las que degradan el material biológico en productos estables no putrefactos, por lo que al reactor biológico continuamente se le debe suministrar oxígeno inyectando aire a través de bombas especiales o por aireadores superficiales.

Debido a que la DBO (sustrato o alimento de las bacterias) se convierte parcialmente en materia celular, ésta debe de extraerse periódicamente para mantener en equilibrio al sistema ya que de lo contrario el aumento desmedido de la biomasa colapsaría al sistema.

Después que el agua a procesar se encuentra durante un cierto tiempo, en contacto con los microorganismos o biomasa en el reactor, fluye a un sedimentador llamado "Sedimentador Secundario" donde los sólidos o biomasa son separados por decantación, y el efluente o agua procesada con bajo valor de DBO, puede ser empleada para ciertos usos pero no como agua potable.

De la parte inferior del sedimentador son extraídos los lodos, los cuales en su mayoría son reciclados y vuelven a alimentar el digestor, ya que esta es una masa biológica sumamente activa, la cual sigue consumiendo material orgánico, que es lo que se desea remover del agua que se procesa.

Los lodos que se deben extraer del sistema para mantener estable y constante la biomasa o población de microorganismos, consisten esencialmente de células (70-80% en peso) y material inerte (20-30% en peso).

La masa microbiana no se encuentra bien digerida o estabilizada, por lo que es enviada a un tratamiento llamado "Digestión Anaerobia". En este proceso se desarrollan otro tipo de bacterias que digieren muy eficientemente el material orgánico residual y se obtienen finalmente los lodos residuales estabilizados.

Dependiendo de las características de las plantas tratadoras y del proceso de operación de las mismas, los lodos estabilizados pueden obtenerse después de una digestión anaerobia, o también la biomasa se puede estabilizar después de una aireación en la cual las células tienen un tiempo de residencia en el reactor de 15 a 30 días, como es el caso del proceso de lodos activados en aireación extendida.

La palabra "lodos estabilizados", significa que los lodos han tenido un proceso de digestión intenso, en el cual los microorganismos entran a fase endógena, y la masa microbiana se convierte en su mayor parte a gases volátiles y células muertas, lo cual tiene dos consecuencias favorables: la disminución de la masa de lodos y la inactivación biológica de la masa microbiana.

Los lodos estabilizados, consisten pues de:

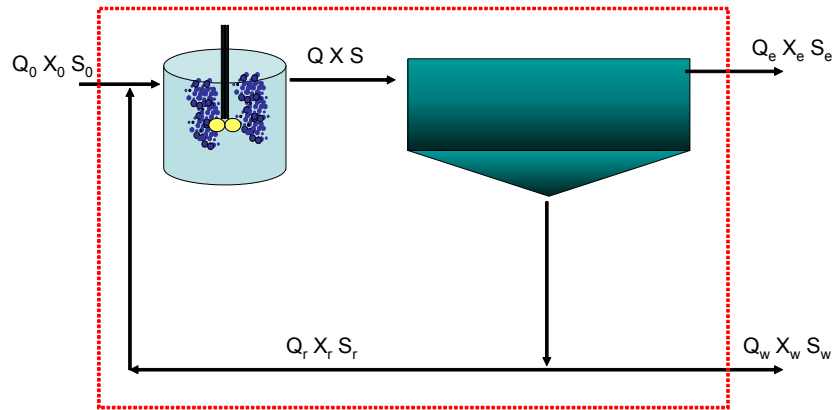
⇒ 70-80% en peso de células muertas o inactivas

⇒ 20-30% en peso de material inerte como: arcillas, silicatos, aluminosilicatos, etc.

Las aguas residuales que llegan a la planta de tratamiento pueden contener agentes tóxicos no biodegradables de naturaleza orgánica e inorgánica como por ejemplo:

Orgánicos: Grasas y aceites minerales, aceite de motor, solventes industriales, diesel, gasolina, detergentes, etc.

Inorgánicos: Metales como: cromo, plomo, cadmio, arsénico, níquel, selenio, etc.; cianuros, ácidos, álcalis, pinturas.



**Figura 1:** Balance de materia en un sistema típico de tratamiento de aguas residuales.

Las fuentes emisoras de estos y otros contaminantes son las aguas domésticas (solventes orgánicos, grasas y aceites minerales) talleres industriales (pinturas, aceites de motor) ó pequeñas y grandes industrias (cromo, plomo, arsénico, ácidos, pinturas, colorantes, aceites lubricantes).

Aún y cuando se ejerce control y cada vez es más estricta la aplicación del reglamento en cuanto a emisión de contaminantes en aguas residuales, es difícil controlar las descargas en casas habitación así como en pequeños talleres o microindustrias, por lo que es de esperarse que los contaminantes sigan apareciendo en las aguas residuales.

De los posibles contaminantes que llegan a una planta de tratamiento de aguas residuales, los compuestos no polares como son: los aceites lubricantes y de motor, solventes orgánicos, etc. forman una capa o nata en la superficie del sedimentador primario y secundario y tienden a concentrarse en esta fase, lo cual es afortunado, ya que de esta manera pueden ser removidos en gran parte, ya que esta capa superficial o nata se separa del seno del agua y se maneja posteriormente y en forma independiente como residuo de la planta.

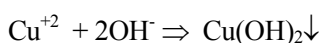
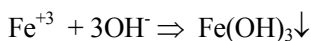
Los metales y compuestos inorgánicos, tienen mayor afinidad por la fase acuosa, razón por la que se encuentran disueltos en ella y la mayor parte de estos contaminantes son parte del agua que sale como efluente de la planta de tratamiento.

En teoría, los lodos residuales consisten de células muertas o inactivas y algo de material inorgánico o inerte. El material inerte procede de las partículas coloidales que arrastran las aguas residuales en su paso a través de la red de drenaje.

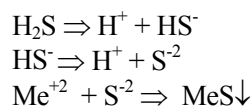
Las células se generan por la acción reproductora de los microorganismos que incorporan el material orgánico desechado en las aguas, convirtiéndolo en tejido celular. A nivel de composición elemental, estas células consisten de: carbono, hidrógeno, oxígeno y en menor cantidad: nitrógeno, fósforo y azufre.

Como resultado de la aireación intensa y prolongada, algunos metales se oxidan y precipitan como óxidos e hidróxidos, por lo que se pueden presentar en el lodo residual extraído.

Por ejemplo el fierro y el cobre precipitan de la siguiente manera:



También, en el proceso de digestión anaerobia el ácido sulfhídrico se disocia a ión sulfuro y precipita metales de la siguiente manera:



Dónde Me es un metal tal como:  $\text{Pb}^{+2}$ ,  $\text{Cu}^{+2}$ ,  $\text{Fe}^{+2}$ ,  $\text{Ni}^{+2}$ , etc.

Esta es la razón por la cual en los lodos residuales o lodos extraídos, se tiene la presencia de metales en una masa de células inactivas y material insoluble.

En los lodos residuales no es factible encontrar agentes tóxicos de naturaleza orgánica tales como: herbicidas, pesticidas ó solventes orgánicos.

En una planta convencional de tratamiento de aguas residuales se tiene un influente y dos efluentes: El influente es el agua residual a procesar; un efluente es el agua tratada o depurada y el segundo efluente es la masa de biosólidos que se extrae para tener en balance el sistema. Si hay presencia de tóxicos orgánicos que puedan estar disueltos en el seno del agua, el mayor porcentaje de ellos se presentará en el efluente de agua tratada, ya que este volumen representa un 99% o más del volumen de agua en el sistema.

Para corroborar este hecho se han analizado muestras de lodos de diferentes plantas de diferentes localidades, cuantificando: DDT, palation, PCB's, dioxinas etc. demostrando que la concentración de estos compuestos está muy por debajo de los valores máximos permitidos en suelos.

Debido a que estos agentes que presentan toxicidad en los humanos, también lo hacen en otros seres vivos como son las células o microorganismos que biodegradan el material orgánico, es razonable inferir que si se presenta una descarga masiva de alguno de estos agentes tóxicos, la biomasa muere y el reactor biológico se inactiva, parando la actividad de la planta, y aún así la concentración de tóxicos en los lodos sería mínima ya que el material orgánico causante de la toxicidad no precipita.

A estas mismas conclusiones ha llegado la EPA y otros organismos similares o equivalentes de Europa, por lo que la normatividad en el uso y manejo de biosólidos o lodos residuales de una planta de tratamiento convencional, se basa únicamente en el riesgo de toxicidad por metales, además del riesgo biológico infeccioso implícito en el manejo de un material orgánico biodegradable.

A los lodos activados extraídos, una vez estabilizados se les llama "biosólidos". Este término se ha empleado últimamente para evitar el uso de la palabra lodo, que en el idioma inglés sobre todo, connota un término desagradable y que establece prejuicios a los mas reacios a aceptar el uso sustentable de este subproducto generado por los que somos usuarios del agua potable y del sistema de drenaje.

Los lodos residuales o biosólidos son un subproducto inevitable de los tratamientos dados a las aguas residuales, tratamientos que a su vez permiten la depuración y reutilización de un recurso tan valioso como es el agua. Como se ha mencionado, los biosólidos se generan debido a que la materia orgánica removida del agua tratada se convierte en masa celular.

La acumulación de los biosólidos en las plantas tratadoras es un problema relevante que afecta al medio ambiente. La producción de estos biosólidos aumentará en el futuro de una manera u otra, y deberán tratarse por diferentes medios.

### **9.1 OPCIONES PARA EL USO O DISPOSICIÓN DE LOS BIOSÓLIDOS**

Relleno sanitario: El envío a relleno sanitario sigue siendo la forma más común de disposición de los biosólidos. La práctica de disponer los lodos residuales de esta manera genera un problema serio, debido a su alto contenido de nitrógeno. Este nitrógeno si no es absorbido por las plantas, es fácilmente lixiviado y tiene una alta movilidad, lo que puede causar eutroficación y contaminación por nitratos en los mantos acuíferos.

La eutroficación consiste en el crecimiento desmedido e incontrolable de una especie, desplazando otra forma de vida, perdiéndose el equilibrio ecológico. Este problema se presenta frecuentemente en lagos y lagunas de nuestro país, debido a los escurrimientos de aguas agrícolas a los vasos o acuíferos disponibles. Esta agua contiene grandes cantidades de nutrientes como nitrógeno y fósforo facilitando el crecimiento desmedido de plantas que requieren de estos nutrientes como es el caso del lirio acuático.

El lirio acuático para su crecimiento y desarrollo requiere de: agua, nitrógeno, fósforo, bióxido de carbono y energía solar para realizar el proceso de fotosíntesis

Otro de los problemas ocasionados por la presencia de nitrógeno en los suelos, es que en el ciclo hidrológico de recarga de los mantos acuíferos, los nitratos estarán presentes si las aguas que se filtran al manto tienen contacto con este compuesto. La presencia de nitratos en las aguas potables implica un riesgo en la salud, sobre todo para los infantes.

Los bebés recién nacidos aún no han desarrollado la flora microbiana con la que cuenta el adulto, y además carecen de una enzima que previene que los nitritos se ligan irreversiblemente a la hemoglobina.

El hecho de que los nitratos son reducidos a nitritos y al no existir la enzima que desliga los nitritos de la hemoglobina provoca en el infante la enfermedad conocida como metemoglobinemia o síndrome del bebé anóxico o asfisiado.

Si esta condición no se corrige a tiempo y no existe un diagnóstico correcto el bebé puede morir, la sintomatología es un color café rojizo en sangre y labios amoratados sintomáticos de asfixia por la falta de oxígeno en órganos vitales. Esta enfermedad no sólo se presenta en infantes también algunos adultos pueden sufrir daños a su salud al consumir agua con alto contenido de nitratos tal es el caso de personas infectadas de SIDA, con problemas de asma o algún otro desorden pulmonar.

La normatividad para aguas potables, permite un máximo de 10 ppm de nitrógeno como nitratos. Si un acuífero supera este valor deberá darse tratamiento a esta agua antes de ser consumidas como potables, por procesos de remoción tales como intercambio iónico, ósmosis inversa, ultrafiltración o procesos similares. Desafortunadamente el costo de tales tratamientos es sumamente elevado y no siempre accesible a los consumidores, por lo que es muy importante conservar la calidad del agua de los acuíferos naturales.

En la actualidad en Europa Occidental se han propuesto normas que prohíben eliminar material biodegradable en los rellenos sanitarios incrementando el uso de tratamientos alternativos.

Confinamiento: Los volúmenes de lodos generados por plantas de tratamiento de aguas de desecho, son mínimos en comparación con el volumen de agua que se procesa, pero son considerablemente grandes en función del gran volumen de agua que se maneja aún en plantas pequeñas.

El manejo y transporte de los biosólidos desde su punto de generación hasta los sitios de confinamiento implica un alto costo de inversión y de operación, por lo que no es una forma convencional de disposición de este residuo.

Incineración: La incineración puede ser considerada como una solución al problema de la acumulación de los biosólidos, y de hecho es una forma que se practica en varios países y localidades, pero se tienen grandes inconvenientes.

⇒ Se requiere un alto costo de inversión y de mantenimiento

⇒ Se producen contaminantes como: óxidos de nitrógeno, dióxido de azufre

⇒ Las altas temperaturas de incineración causan la volatilización de metales de bajo punto de ebullición y de carácter tóxico como son: plomo, arsénico, cadmio, mercurio, selenio, etc.

Así pues, la incineración no es una solución ecológicamente atractiva y por sus efectos dispersivos no elimina los contaminantes que puedan estar presentes en los biosólidos, sino que los redistribuye en el aire, el agua y el suelo...

Fertilizante y mejorador de suelos: Los biosólidos tienen un alto contenido de materia orgánica, nitrógeno, fósforo y sales minerales que lo hacen muy adecuado para su uso como fertilizante y mejorador de suelo.

Una práctica habitual en los países desarrollados es la aplicación de los lodos residuales a suelos agrícolas.

La dosis de aplicación se establece en función del requerimiento de nitrógeno y fósforo del cultivo.

Cuando los biosólidos son aplicados al suelo natural se observa:

- Mejora la fertilidad del suelo y el rendimiento de los cultivos.
- Proporciona nutrientes elementales a las plantas.
- Mejora estructura y porosidad del suelo.
- Proporciona materia orgánica al suelo
- Mejora la permeabilidad del suelo, reteniendo en mayor grado la humedad

- Reduce la erosión del suelo.

Otro criterio adicional para la aplicación de los biosólidos es la Tasa Agronómica. Esta indica los nutrientes que deben suministrarse a un cultivo específico, y al relacionar el contenido de nitrógeno en el biosólido, se estima la cantidad por hectárea que debe integrarse al suelo.

El valor de la Tasa Agronómica es un indicador para la aplicación de la cantidad de nitrógeno adecuado o requerido; el exceso de este nutriente no es asimilado por las plantas y el nitrógeno residual o no asimilado por la planta, resulta un problema de tipo ambiental y de salud, por la mencionada posibilidad de contaminación de los acuíferos con nitratos.

**Tabla 1:** Requerimientos de nitrógeno en algunos tipos de cosechas

<i>Cosecha</i>	<i>Nitrógeno recomendable Kg. de Nitrógeno/Hectárea</i>	<i>Cosecha</i>	<i>Nitrógeno recomendable Kg. de Nitrógeno/Hectárea</i>
Maíz de temporal	134	Zanahorias	134
Maíz de riego	224	Coliflor	134
Algodón	78	Pepino	89
Avena	89	Uva	67
Sorgo	112	Cebolla verde	224
Soya	0	Pasto casero	268
Tabaco	78	Papa Irish	168
Manzana	33 a 89	Lechuga	89
Espárragos	78	Nectarina	44 a 89
Brócoli	134	Cebolla	134
Papa dulce	100	Durazno	44 a 89
Tomate	140	Pera	33 a 89
Trigo	89	Chile pimienta	134
Espinacas	134	Fresa	145

*Tasa agronómica:* La tasa agronómica se calcula con el nitrógeno disponible para la planta (NDP), y el factor de mineralización de los biosólidos (FM). El factor de mineralización para los lodos activados digeridos aeróbicamente tiene un valor de 0.3 y para los lodos digeridos anaeróbicamente este valor es de 0.2.

Otros parámetros necesarios para corregir la disponibilidad del nitrógeno es el factor de volatilización (FV). Esto se debe a que parte del amonio se convierte en amoniaco el cual es volátil y ya no es disponible para la planta. Este factor de volatilización depende de la forma en que es aplicado el fertilizante.

FV = 0.5 Si el biosólido se aplica superficialmente.

FV = 0.75 Si es aplicado superficialmente e incorporado al suelo.

FV = 1.0 Si es inyectado bajo la superficie del suelo.

## 9.2 NORMATIVIDAD DEL USO DE LOS BIOSÓLIDOS

La normatividad ambiental en México respecto a la clasificación de diferentes sustancias por parte de las autoridades competentes, es basada en la norma CRETIB, lo cual clasifica a un material respecto a su riesgo en: Corrosividad, Reactividad, Explosividad, Toxicidad, Inflamabilidad, Biológico infeccioso.

De acuerdo a esta clasificación los lodos residuales implican un riesgo en el aspecto tóxico y biológico infeccioso (NOM-053-ECOL). Debido a que los biosólidos tienen un alto contenido de materia orgánica es evidente que tengan una alta actividad microbiana existiendo la presencia de microorganismos patógenos y no patógenos. Entre los microorganismos patógenos se encuentran la *Salmonella*, *Shigella*, *Gardia Lambia*, *Cryptosporidium* y *Escherichia Coli*.

Debido al contenido de patógenos existentes es recomendable que los biosólidos sean sometidos a algún proceso de desinfección para la destrucción de los mismos.

Existe varios métodos de desinfección que pueden ser empleados y entre estos se encuentran los siguientes.

Desinfección por radiación ultravioleta: desde 1901, fecha en que se inventó la lámpara de mercurio, la radiación ultravioleta ó UV, ha sido empleada como medio de desinfección.

La línea de emisión de 254 nm que emite intensamente esta lámpara es letal para las bacterias y virus, ya que este tipo de radiación daña irreversiblemente la estructura celular, al descomponer fotoquímicamente el ácido ribonucleico RNA y desoxirribonucleico DNA.

Su efectividad en cierto tipo de microorganismos no es tan efectiva como lo son el cloro y el ozono, ya que algunos microorganismos tipo quiste tienen una capa protectora que impide que la radiación UV tenga contacto con el tejido.

Este método se considera inoperante ya que para que el proceso de operación sea efectivo, la solución a tratar debe estar libre de partículas sólidas, lo cual no es el caso de los lodos residuales.

Desinfección con ozono: El ozono ha sido ampliamente empleado como medio de desinfección en aguas potables y aguas residuales tratadas, su efectividad es más alta que la de otros agentes desinfectantes ya que tiene mayor potencial de oxidación.

El ozono, en forma similar a como ocurre con el cloro, destruye o inactiva las enzimas de los microorganismos y esa es la razón de su capacidad bactericida.

La mayor desventaja del ozono y su limitante en su aplicación como desinfectante de lodos residuales o biosólidos, es que reacciona con la materia orgánica, lo cual causa un alto consumo de ozono, además de que favorece la formación de peróxidos y superóxidos como aldehídos y cetonas, de naturaleza altamente tóxica.

Desinfección por cloración: La desinfección por medio de cloro, no es una opción viable para la inactivación de los microorganismos presentes en los lodos de desecho. La gran cantidad de material orgánico presente en el sólido, demanda una gran cantidad de cloro, lo cual implica un alto gasto, además de que por las razones mencionadas de una gran biomasa se favorece la formación de los trihalometanos, los cuales son de naturaleza tóxica.

Desinfección con calor: La desinfección de los biosólidos con calor es una alternativa sumamente viable para su disposición. El calor no induce a la formación de sustancias tóxicas colaterales y su efectividad es alta, inactiva a los patógenos más comunes encontrados en los biosólidos.

Si se pretende hacer uso de los biosólidos directamente como fertilizante y mejorador de suelos, los microorganismos patógenos y no patógenos presentes, mueren después de un cierto tiempo, su período de supervivencia en el suelo está en función de las condiciones de temperatura, humedad, grado de insolación, nivel de materia orgánica y microflora del mismo. En cualquier circunstancia es necesario secar y desinfectar los biosólidos para su uso, de lo contrario se deberá manejar con la leyenda de material biológico infección

### **9.3 CLASIFICACIÓN DE LOS LODOS RESIDUALES POR SU CONTENIDO DE METALES PESADOS SEGÚN LA EPA.**

El contenido de metales pesados en lodos residuales típicamente se establece en dos parámetros de clasificación. El contenido de estos metales le confiere a los lodos una clasificación 1 y 2.

Si la concentración de metales son menores a los clasificados como nivel 1, estos pueden ser manejados, distribuidos y aun comercializados en bolsas. Estos podrán aplicarse a cualquier medio tal como: jardines de casa, invernadero, campos de golf, parques recreativos, etc., y no es necesario un inventario de su aplicación.

Si los niveles o concentraciones de uno o más de los metales regulados excede los valores límites establecidos en el nivel 1, el criterio que se sigue es clasificarlos como biosólidos clase 2. Estos biosólidos pueden aplicarse en sitios específicos y deberán cumplir con las restricciones en lo referente a límite anual y límite acumulativo como se indica en la tabla 2.

Un ejemplo de acuerdo a esta tabla, el límite anual establece que con relación al cobre únicamente se podrán agregar 75 Kg por hectárea por año de este metal, mientras que al considerar el límite acumulativo, lo máximo que se podrá aplicar a este suelo serán 1500 Kg por hectárea y una vez alcanzado este límite ya no se podrá aplicar biosólidos en este suelo.

De acuerdo al criterio mencionado con anterioridad, la dosificación de biosólidos estará determinada por:

⇒ La tasa agronómica

⇒ La dosificación anual de metales contenidos en los lodos

⇒ El límite acumulativo de un metal en particular.

**Tabla 2:** Clasificación de los lodos de acuerdo al contenido de metales pesados

<i>Metal</i>	<i>Clase 1 mg/Kg</i>	<i>Clase 2 mg/Kg</i>
As	41	75
Cd	39	85
Cr	1200	3000
Cu	1500	4300
Pb	300	840
Hg	17	57
Ni	420	420
Se	36	100
Zn	2800	7500

**Tabla 3:** Límite máximo permisible de metales aplicados en suelo.

<i>Metal</i>	<i>Límite acumulativo Kg/hectárea</i>	<i>Límite anual Kg/hectárea</i>
As	41	2
Cd	39	1.9
Cu	1500	75
Pb	300	15
Hg	17	0.85
Ni	420	21
Se	100	5
Zn	2800	140

#### **9.4 CLASIFICACIÓN DE LOS LODOS RESIDUALES POR SU CONTENIDO DE PATÓGENOS O CALIDAD MICROBIOLÓGICA**

De acuerdo a su calidad microbiológica los biosólidos pueden ser clasificados como clase “A” y “B”. Los biosólidos clase “A” son aquellos que han recibido un tratamiento drástico de desinfección, casi siempre por secado a altas temperaturas que van desde los 105°C a los 200°C.

Los biosólidos clase “A”, en lo que se refiere a su carácter microbiológico son seguros en su manejo y pueden emplearse sin restricciones de manera similar como se hace con los biosólidos clase 1 anteriormente mencionados.

Los biosólidos tipo “B” son aquellos que han recibido un tratamiento de desinfección menos estricto. Por ejemplo, cuando los lodos residuales son esparcidos en un terreno y se dejan secar en forma natural por acción de los rayos ultravioletas de la luz solar disminuyendo del contenido de patógenos. Esta clase solo debe emplearse en sitios restringidos, donde no haya acceso al público en general, como por ejemplo en sitios en reforestación.

**9.5 USO Y DISPOSICIÓN FINAL DE LOS LODOS RESIDUALES:** La disposición, confinamiento o uso sustentable de los lodos residuales son las únicas formas de manejar este subproducto de los sistemas de tratamiento de aguas residuales.

El confinamiento o destrucción por calcinación de estos biosólidos implica un alto costo y en el aspecto ambiental no está exento de las desventajas que implica una calcinación.

El uso sustentable de estos biosólidos en suelos y en la agricultura es una forma de aprovechar los mismos, pero deberán ejercerse los controles necesarios para cumplir con la normatividad que regula el uso de los biosólidos en reforestación y en agricultura.